

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
Katedra energetických zařízení



Bc. Roman Paleček

Studie proveditelnosti sušení alternativního paliva s využitím odpadního tepla

(Feasibility study of alternative fuel drying with use of recovery heat)

Vedoucí bakalářské práce: Ing Petra Dančová, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Ing. Gabriela Svobodová, CSc.

Rozsah práce:

Počet stran: 60

Počet obrázků: 48

Počet tabulek: 2

Počet grafů: 3

Počet příloh: 1

Anotace

Diplomová práce se zabývá možností využití odpadního tepla k sušení alternativního paliva, vznikajícího při procesu výroby slínku v cementárně. V práci jsou shrnuty dosavadní poznatky o sušení plodin a paliv. Je zde popsána metoda měření výhřevnosti paliva v závislosti na obsahu vody a metoda bezkontaktního měření teploty. V práci je prezentováno možné praktické využití odpadního tepla k sušení alternativního, v tomto případě, rozdrčeného tříděného komunálního odpadu včetně návrhu zařízení.

Annotation

The thesis deals with the possibility to use waste heat for drying of alternative fuel produced during the manufacturing process of clinker. In the beginning, the current knowledge about drying agricultural products and fuels are summarized. A method of measuring the calorific value of fuel depending on the water content and method for non-contact temperature measurement by IR camera are described in this work. This work presents the practical utilization of waste heat for drying alternative - crushed sorted municipal waste including proposal of drying equipment, in this case.

Klíčová slova

Využití odpadního tepla, sušení alternativního paliva, úspora energie, výhřevnost

Keywords

waste heat, drying of alternative fuel, energy savings, calorific value

Zadání diplomové práce

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 21.5.2013

Roman Paleček

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 21.05.2013

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No.121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant

Date: 21.05.2013

Signature:

V úvodu své diplomové práce bych rád poděkoval Ing. Petře Dančové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, cenné rady a připomínky, které mne vedly po celou dobu potřebnou k vypracování práce. Vřelý dík zaslouží i Ing. Gabriela Svobodová, CSc., bez jejíž pomoci a cenných rad v oblasti měření by práce trvala mnohem delší dobu.

1	Úvod	11
1.1	Souhrn dané problematiky	11
1.2	Charakteristika cementářského provozu.....	12
1.2.1	Proces výroby cementu.....	12
1.2.2	Výhody užití odpadních látek jako alternativního paliva.....	13
1.2.3	Typy používaného alternativního odpadu	15
1.3	Cíl a rozsah diplomové práce.....	16
2	Teoretická část.....	17
2.1	Určení výhřevnosti paliva.....	17
2.1.1	Úvod do problematiky výpočtu výhřevnosti paliva	17
2.1.2	Výpočet výhřevnosti paliva	17
2.1.3	Testovací zpráva	18
2.2	Hygrometr IR 5000	18
2.2.1	Nepřetržité měření vlhkosti	18
2.2.2	Princip měření.....	19
2.3	Měření termo (IR) kamerou.....	20
2.3.1	Infračervené záření.....	20
2.3.2	Základní vztahy.....	21
2.3.3	Princip zobrazení teploty	22
2.4	Sušení	23
2.4.1	Způsoby kontaktu plynu se sušeným materiálem	23
2.4.2	Bubnová sušárna	25
2.4.3	Bilance hmotnosti a entalpie při nepřetržitém sušení.....	26
2.5	Výměníky tepla.....	27
2.5.1	Účel výměníku tepla.....	27
2.5.2	Rozdělení výměníků.....	27
2.5.3	Způsoby sdílení tepla ve výměnících.....	29
2.5.4	Prostup tepla stěnou	30
2.6	Numerická metoda řešení	32
2.6.1	Vytváření sítě.....	32
2.6.1	Bilanční rovnice v obecném tvaru	32
3	Experimentální část.....	33
3.1	Určení výhřevnosti paliva.....	33

3.1.1	Příprava vzorku a měření spalného tepla v palivu za konstantního objemu	33
3.1.2	Automatizované měření v kalorimetru PARR 6300	35
3.1.3	Pracovní postup stanovení spalného tepla kalorimetricky	35
3.1.4	Vyhodnocení výsledků	36
3.2	Měření vyzařovaného tepla pomocí infrared (IR) kamery	36
3.2.1	Typ použité kamery	36
3.2.2	Výběr vhodných míst pro odběr tepla	37
3.2.3	Cyklónový výměník, předkalcinátor	39
3.2.4	Odvod odpadního vzduchu z chladiče slinku	39
3.2.5	Chladič odpadního vzduchu před vstupem do filtrů	42
3.3	Výpočet potřebného množství vzduchu k sušení	42
3.3.1	Zadání	42
3.3.2	Vlastnosti sušeného materiálu	42
3.3.3	Množství vzduchu potřebného k vysušení materiálu	42
3.4	Výpočet primárního výměníků:	43
3.4.1	Protiproudý trubkový výměník:	43
3.4.2	Výpočet součinitele přestupu tepla oleje	44
3.4.3	Shrnutí výpočtu výměníku	46
3.5	Výpočet sekundárního výměníku	46
3.5.1	Deskový výměník tepla	47
3.5.2	Návrhový výpočet	47
3.5.3	Návrh oběhového čerpadla	49
3.5.4	Návrh ventilátoru	50
3.5.5	Výpočet rozměrů sušárny	51
3.6	Ekonomické vyhodnocení sušení alternativního paliva	52
3.6.1	Ukazatele ekonomického vyhodnocení	52
3.6.2	Výpočet tepelné a finanční náhrady	52
3.6.1	Výpočet ročních úspor při použití vysušeného paliva	53
4	Závěr	55
4.1	Navržené zařízení	55
4.2	Možné pokračování diplomové práce	56
5	Seznam použité literatury	58

POUŽITÉ VELIČINY

a	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	teplotní vodivost
b	$[W \cdot m]$	hodnota konstanty vychází výpočtem z Planckova zákona ($2,898 \cdot 10^{-3}$)
c	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost světla ve vakuu (299 792 458)
c_p	$[J \cdot kg^{-1} K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita izobarická
dt	$[^{\circ}C]$	rozdíl teplot na povrchu stěny
d_u	$[m]$	určující rozměr
g	$[m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
Gr	[1]	Grashoffovo číslo
h	$[J \cdot s]$	Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$)
h_o	$[J \cdot kg^{-1}]$	entalpie vstupujícího vzduchu
h_1	$[J \cdot kg^{-1}]$	entalpie sušícího vzduchu
h_2	$[J \cdot kg^{-1}]$	entalpie vystupujícího vzduchu
h_{mi}	$[J \cdot kg^{-1}]$	entalpie vstupujícího materiálu
h_{me}	$[J \cdot kg^{-1}]$	entalpie vystupujícího materiálu
k	$[J \cdot K^{-1}]$	Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$)
M	[%]	vlhkost (pro vysušené palivo $M = 0$)
Nu	[1]	Nusseltovo číslo
\dot{m}_A	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok vysušeného materiálu
\dot{m}_B	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok sušícího plynu
\dot{m}_C	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok sušeného materiálu
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
q	$[W \cdot m^{-2}]$	je měrný tepelný tok, prošlý za jednotku času jednotkovou plochou
$q_{p,net,m}$	$[J \cdot g^{-1}]$	výhřevnost - spalné teplo, zmenšené o výparné teplo vody, vzniklé z paliva během hoření
$q_{V,gr,d}$	$[J \cdot g^{-1}]$	spalné teplo - množství tepla, uvolněné úplným spálením paliva v kalorimetrické tlakové nádobě v prostředí stlačeného kyslíku při teplotě 25 °C, vztažené na jednotku jeho hmotnosti Zbylými produkty jsou nejčastěji plynný kyslík, oxid uhličitý a kapalná voda, případně také popel, kyselina siřičitá nebo dusičná., v Joulech na gram, resp. v násobcích MJ/kg
$q_{V,net,m}$	$[J/g]$	výhřevnost paliva s vlhkostí M za konstantního objemu
\dot{Q}_e	$[W]$	ztráty
\dot{Q}_i	$[W]$	případný dodatečný tepelný příkon
\dot{Q}_k	$[W]$	tepelný příkon
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
r	$[m]$	poloměr
t	$[K]$	teplota
t_1	$[K]$	teplota povrchu obtékaného tělesa
t_2	$[K]$	teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu

Δt	[K]	rozdíl teploty tekutiny
w	[m.s ⁻¹]	rychlost proudění
W	[W.m ⁻²]	celková vyzářená energie tělesa
$w(\text{H})_d$	[%]	podíl vodíku v suchém palivu (vodíku v hydratovaných minerálech a elementárního vodíku v pevných palivech),
$w(\text{N})_d$	[%]	obsah dusíku v suchém palivu
$w(\text{O})_d$	[%]	obsah kyslíku v suchém palivu
w_{bb}	[W.m ⁻²]	intenzita vyzařování absolutně černého tělesa
w_o	[W.m ⁻²]	intenzita vyzařování reálného tělesa
W_λ	[W.m ⁻²]	spektrální hustota intenzity vyzařování
X_A	[g/kg.sv]	hodnota vlhkosti materiálu
Y_A	[g/kg.sv]	hodnota vlhkosti sušícího plynu
α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	je střední součinitel přestupu tepla konvekcí
β	[K ⁻¹]	teplotní roztažnost tekutiny $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)$
γ	[1.K ⁻¹]	izobarický součinitel objemové roztažnosti
δ	[m]	je tloušťka stěny
ε	[1]	emisivita tělesa. Emisivita absolutně černého tělesa $\varepsilon = 1$
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
λ_{\max}	[m]	vlnová délka
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita tekutiny
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
φ	[%]	relativní vlhkost
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefanova-Boltzmannova konstanta (5,67.10 ⁻⁸)
ψ	[1]	součinitel zaplnění sušícího bubnu

1 Úvod

1.1 Souhrn dané problematiky

Na začátku 20. století se začali lidé zabývat myšlenkou, zda by nebylo možné využít odpadní teplo pro sušení. Jednu z prvních prací otiskl Vondráček [1] již v roce 1925. Tato publikace se zabývá absorpcí plynů při sušení paliv. O rok později, jeho současník Černý [2] vynalezl a popsal dosušování obilí a píce obyčejným i vyhřátým vzduchem. To bylo dobrým startem pro hlubší zkoumání. Objevila se touha vylepšit a zdokonalit získané poznatky, které následně shrnul a vydal v 2. polovině 19. století Šmíd [3]. Jednalo se o technické informace týkající se odpadního tepla a jeho možného využití. Několik let poté se začal Pawlica [4] zabývat modernizováním mobilních sušáren pro obiloviny. Krátce na to lidé začali uvažovat o možných netradičních zdrojích energie, a to hlavně v podobě vytápění sluneční a geotermální energií, bioplynem a odpadním teplem [5]. Později tuto myšlenku netradičních zdrojů, spolu se spotřebou paliv racionalizoval Haš v [6].

Kolem roku 2000 se rozmáhá sušení ve velkokapacitních senících, kterým se zabývali např. Hutla [7] a Neuberger [8]. Hutla se zaměřil na dosoušení energetické štěpky v těchto senících, Neuberger se věnoval automatizaci sušicího procesu ve velkokapacitním seníku. V tomto období se začaly více zkoumat vlastnosti biomasy a možné způsoby, jak by se s její pomocí dalo topit. Nacházelo se mnoho netradičních zdrojů biomasy. Jako příklad lze uvést Kavanův [9] projekt, kde se spalovaly vylišované a vyslazené cukrovarské řepné řízky. Také byly vypracovány metody, které zhodnotily účinnost výměníků, např. Adamovský [10]. Díky



Obr. 1.1 Velkokapacitní seník
(zdroj: www.tzb.info.cz)



Obr. 1.2 Hrabíčková sušička
(zdroj: www.pawlica.cz)

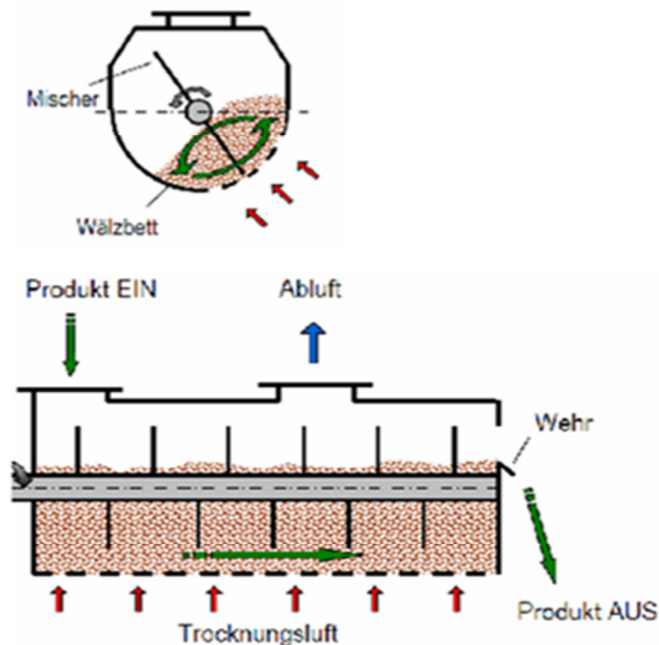
zhodnocené účinnosti se pak dalo pracovat na konceptu pro zpětné získávání tepla z větracího vzduchu. Další publikace z tohoto období je sborník přednášek na téma využití odpadu jako paliva [11]. Toto téma se v následujících letech hodně rozvíjelo.

Po přelomu tisíciletí vydává Hutla publikace [12,13] na téma optimalizace procesů při dosoušení energetických plodin pro energetické využití. Konkrétně se zaměřil na sušení odpadní kůry pro energetické využití. Procesy se poté ještě více modernizovaly a metody se upravovaly tak, aby byly co nejvíce perspektivní. Souběžně s Pawlicou [14] zkoumali technologie pro

modernizaci posklizňového ošetření zrnin snížením energetické spotřeby, snížením nákladů a zvýšením kvality finálních produktů. V roce 2004 Kolat ve své práci [15] hodnotil možné energetické technologie pro využití alternativních paliv a zpracoval energetické využití biopaliva na bázi kalů z čistíren odpadních vod. Tuto problematiku technologicky dále zpracovala o tři roky později Raclavská v [16]. Došlo k dalšímu rozvoji technologických systémů pro využití biopaliv z energetických plodin, např. Kára [17], a v roce 2007 se na téma předpoklady využívání zemědělské a lesnické biomasy na energetické a biotechnické využití konala vědecká rozprava v Nitře, viz [18]. Hutla [19] se začal blíže zabývat aerodynamickým odporem vrstvy energetické štěrky, a jejího vlivu na výsledný proces. Pawlica ve své práci [20] rozvíjel myšlenku sušení odpadního tepla z bioplynové stanice.

V roce 2012 Ivanova vysoušela třeshňové hobliny v experimentálním biomasovém sušáku se solárním kolektorem, viz [21]. V témže roce Krutil ve své práci [22] numericky modeloval proudění tekutin s přestupem tepla a hořením v průmyslových aplikacích.

V průběhu let výzkumu vznikají stále nové postupy a metody co nejefektivnějšího využití. To se týká i zpřesnění technologií zpracování biomasy včetně sušení (místo i podmínky). Zároveň se objevují studie na možné netradiční zdroje energie. Zkoumají se možnosti pro sušení biomasy s využitím senků či kalů z čistírek odpadních vod.



Obr. 1.3 Sušárna Allgaier s válcovým ložem (zdroj: www.allgaier.de)

1.2 Charakteristika cementářského provozu

1.2.1 Proces výroby cementu

Výroba cementu je velice energeticky náročná, průměrná energetická spotřeba na výrobu jedné tuny slinky je přibližně 3950 MJ.

Nejdůležitějšími surovinami pro výrobu portlandského cementu jsou vápence, dále tufy (druh horniny ze sopečného popelu), břidlice a další horniny. Tyto materiály jsou těženy v lomech za pomoci odstřelů, nebo pouze rypadlem za použití těžké techniky. Kolové nakladače a nákladní automobily dopravují surovinu do drtírny. V drtičích jsou velké kameny postupně rozdraceny zhruba na velikost silničního štěrku.

Rozdrcený materiál je za pomoci pásového dopravníku, lanovky, železnice nebo ve výjimečných případech i nákladních automobilů dopravován na skládku suroviny. Zde je surovina řízeně ukládána, čímž dochází k její před-homogenizaci.

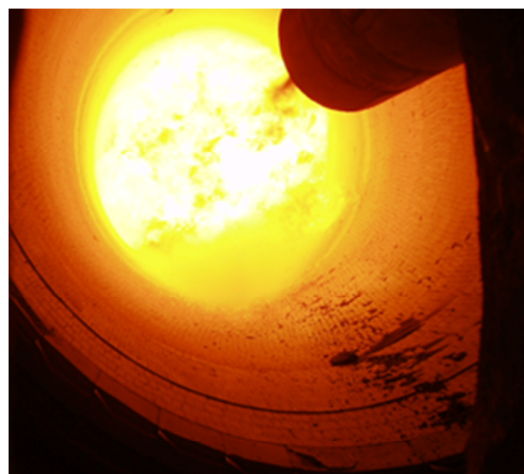
Požadovaná směs rozdrcené základní suroviny a korekčních surovin (další suroviny potřebné pro výrobu portlandského slínku, např. popílek, struska, křemičitý písek nebo železitá korekce) je připravována za pomoci přesných měřicích zařízení. Mlýnice s válcovými nebo kulovými mlýny rozemelou surovinovou směs na jemný prášek a současně ji vysuší. Poté je rozemletá surovina dopravena do sil na surovinovou moučku a zde je dále homogenizována.

Výpal suroviny probíhá za teploty cca 1450 °C v rotační peci se soustavou tepelných výměníků nebo také s kalcinátorem. Při procesu známém jako slinování a po následném prudkém zchlazení vzniká díky chemické přeměně surovinové moučky nový produkt – portlandský slínek.

Hotový slínek je uskládán ve slínkovém silu. Odtud je slínek dopravován do kulových cementových mlýnů, kde je spolu s regulátorem tuhnutí (síránem vápenatým) semlet na velmi jemný prášek – portlandský cement. V průběhu mletí mohou být do mlýnice dávkovány i další složky (vysokopecní granulovaná struska, popílek, vápenec aj.) v závislosti na požadovaném druhu cementu [23].

1.2.2 Výhody užití odpadních látek jako alternativního paliva

Výroba slínku v cementářské rotační peci je bezodpadovou technologií. Podmínky spalování v cementářských pecích jsou takové, že je možno spalovat alternativní paliva v širokém rozsahu složení, původu a vlastností bez rizika pro životní prostředí. Proces je charakterizovaný vysokou filtrační schopností souproutně a protiproutně se pohybujících částic, obsahujících kromě CaCO_3 i volné CaO . Tyto částice díky intenzivnímu styku s kouřovými plyny jsou schopny zachytit ze spalín veškeré kyselé reagující složky, jako jsou SO_2 , Cl , F . Kromě toho hlavně ve stabilizátoru a elektrostatickém odlučovači slouží jako kondenzační jádra, na nichž se účinně zachycují i sloučeniny těkavých těžkých kovů, kterými jsou Hg a Tl . Ostatní kovy se vážejí do krystalové mřížky slínkových minerálů s účinností více jak 95 % tak pevně, že se ani ze zatvrdlého betonu, vyrobeného z takového cementu neuvolňují a výluhy z betonu splňují požadavky na pitnou vodu. Teplota plamene společně s dobou zdržení paliva v plameni umožňuje také dokonalou destrukci a vyhoření všech organických látek včetně polychlorovaných bifenylů (PCB) a chlorovaných uhlovodíků.



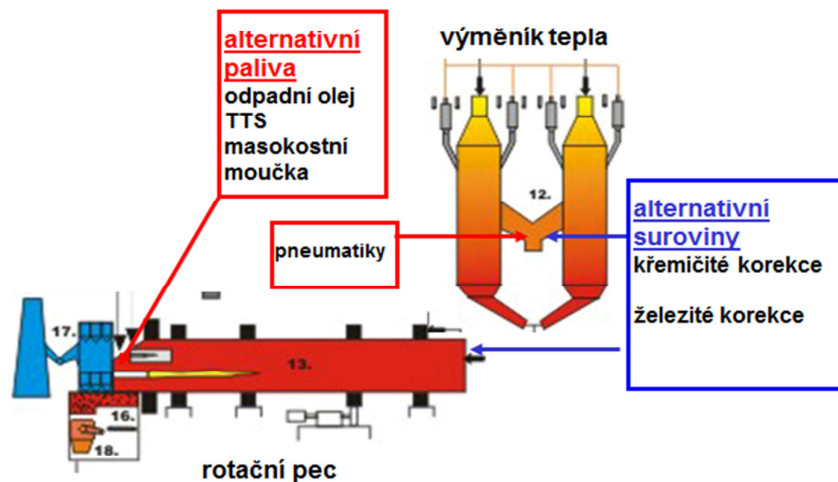
Obr. 1.4 Hořák a plamen v rotační peci (zdroj: Holcim)

Výhoda zhodnocení různých vyříděných částí odpadů ve formě alternativních paliv spočívá v bezodpadové destrukci organických látek a v intenzivním a vysoce účinném

zachycení těžkých kovů a kyselých škodlivin, čímž je umožněna úspora přírodních neobnovitelných zdrojů paliv a surovin a redukce objemu odpadů ukládaných na skládky při minimálním riziku pro životní prostředí a zdraví. Některé z alternativních paliv a materiálů představují pouze zdroj energie, byť i třeba velmi vydatný (např. směsi odpadního papíru a plastů mají výhřevnost jako kvalitní černé uhlí), některé svým nespalitelným podílem jsou významnou součástí surovinové směsi pro výpal cementářského slínku. V některých případech se tato nespalitelná složka může stát velmi důležitým zdrojem, např. oxidu železitého v surovině. Při výrobě cementářského slínku se jejich nespalitelná složka stává součástí surovinové směsi a nahrazuje jiné surovinové složky. Celý pecní systém sestávající se z disperzních výměníků tepla, předkalcinátoru, rotační pece, chladiče slínku, stabilizátoru a elektrostatického odlučovače prachu představuje dokonalý systém pro zachycení a bezodpadové zneškodnění škodlivin, vznikajících při spalovacím procesu.

Teplota v plameni dosahuje 2100 °C a délka plamene až 15 m. Doba zdržení hořícího paliva v plameni je při běžných rychlostech proudění plynů v rotační peci asi (2 – 5) sekund při teplotě proudící vzdušiny nad 1200 °C podle velikosti zařízení. Rychlost paliv hořáku (25 -35) sekund. Teplota a doba zdržení spolu s mírně oxidačním prostředím představují ideální podmínky pro tepelnou destrukci a oxidaci molekul i takových látek, jako jsou halogenované uhlovodíky, PCB nebo dioxiny, furany (PCDD/DF). Spalování v cementářské rotační peci probíhá za minimálního nutného přebytku vzduchu. Proto je pecní atmosféra v celém objemu pece oxidační. Výměňkový systém jako celek funguje jako souproutně protiproudý, kde jednotlivé stupně výměňkového systému jsou zároveň vlastně cyklónovými odlučovači, v nichž předeheřiváný materiál postupuje v souproutdu se spaliny. Mezi tuhou fází a kouřovými plyny dochází k intenzivnímu kontaktu. Výměňkový systém tak plně nahrazuje druhý stupeň čištění kouřových plynů s mnohem vyšší účinností, než je tomu u komerčních zařízení tohoto druhu ve spalovnách (polosuchá vypírka vápenným mlékem).

Alternativní paliva a suroviny - dávkovací místa



Obr. 1.5 Schéma dávkování paliva a surovin

1.2.3 Typy používaného alternativního odpadu

- **Použité pneumatiky**, pro které není další využití, jsou spalovány jako palivo v cementářských rotačních pecích. Je to zřejmě lepší než pneumatiky ukládat na skládkách, či vidět, jak se válejí podél silnic anebo na černých skládkách. Odborníci z oboru vulkanizace dokazují, že vulkanizovaný kaučuk není nejvhodnější pro tuto recyklaci. Ekonomové rovněž uvádějí, že výroba pneumatik z nových surovin je lacinější.
- **Městské čistírenské kaly**. Problematika odstraňování městských čistírenských kalů mimo tradiční způsoby, tj. ukládání na vhodné skládky, je zvýšenou měrou sledována v zahraničí i v ČR. Hlavním důvodem je především fakt, že kaly svým obsahem škodlivin, a to především obsahem těžkých kovů, často nesplňují limity, umožňující jejich využívání pro zemědělské účely, ať již pro přímou aplikaci do půdy nebo jako substrát pro výrobu kompostu. Energetický potenciál vyhnílených vysušených odpadních kalů, který se pohybuje v rozmezí cca (8 – 11) MJ/kg suchého kalu, umožňuje jejich využití jako příměsi uhelného paliva.
- **Tuhý komunální odpad** se vyskytuje ve formě, která neumožňuje přímé dávkování do rotační pece a je nutno jej předem upravovat a třídít. Úprava odpadů je změnou fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností odpadů za účelem umožnění jejich přepravy, dopravy, využití nebo odstranění za účelem snížení, případně vyloučení jejich nebezpečných vlastností. Využívání odpadů je činnost vedoucí k získání druhotných surovin z odpadů, k recyklaci odpadů, případně jiné využití odpadů. Recyklace odpadů je systém opětovného využití odpadů jako surovinového zdroje.

Fyzikální stav odpadu je rozhodující pro způsob manipulace a dávkování. V zásadě je nutno, aby odpad či jeho složka určená ke spálení přicházela ve formě vhodné ke spalování v hořáku na tuhé palivo. V současné době jsou cementárny vybaveny z důvodů operativní změny paliv vícepalivovými hořáky s možností vstupu přídatného paliva do centrální trysky hořáku, takže toto palivo vždy prochází nejteplejší centrální zónou plamene. To umožňuje dokonalé spálení dávkovaného přídatného paliva. Podmínkou pro spalování tohoto paliva cestou přes hořák je vhodná zrnitost, (většinou do 45 mm) a dostatečné vysušení, aby materiál nebyl lepkavý. V praxi to znamená úpravu odpadu či jeho spalitelné složky sušením a drcením. [24].

Tab. 1 – Porovnání množství emisí

Emise (mg.m ⁻³)	Konvenční palivo	Konvenční palivo + 30 % spalitelné složkyTKO
TZL	9,0 – 10,0	9,0 – 10,0
NO _x	160	162
SO ₂	76,0	56,36
Cl	1,045	0,762
F	0,057	0,0519
Pb	0,006	0,006
Cd	0,005	0,001
Hg	0,011	0,005
Cr	< 0,001	< 0,001
Zn	< 0,001	< 0,001

1.3 Cíl a rozsah diplomové práce

Diplomová práce je zaměřena na určení závislosti výhřevnosti alternativního paliva, v tomto případě drceného tříděného komunálního odpadu, na obsahu vlhkosti. Obsah vody v palivu výrazně ovlivňuje výhřevnost paliva a v závislosti na ročním období se značně liší. Toto kolísání vlhkosti způsobuje velké problémy při procesu výroby slínku v rotační peci. V práci je popsán postup měření vlhkosti včetně roční statistiky a výsledného grafu.

Součástí práce je také určení a změření potenciálních míst, vhodných k odběru tepla a jeho dalšího využití. V práci jsou prezentovány výsledky měření termo (IR) kamerou.

Hlavním cílem diplomové práce je prověření možnosti využití odpadního tepla vznikajícího při technologickém procesu výroby slínku v rotační peci k sušení alternativního paliva a návrhu zařízení.

Práce je rozdělena do následujících kapitol:

1. Souhrn současných poznatků dané problematiky.
2. Určení výhřevnosti alternativního paliva v závislosti na obsahu vody.
3. Analýza možností využití odpadního tepla.
4. Návrh zařízení pro sušení alternativního paliva.



Obr. 1.6 Cementárna Holcim v Prachovicích

2 Teoretická část

2.1 Určení výhřevnosti paliva

2.1.1 Úvod do problematiky výpočtu výhřevnosti paliva

Důležitými termíny v oblasti kalorimetrie jsou spalné teplo a výhřevnost. Hlavní rozdíl mezi výhřevností a spalným teplem spočívá v tom, že veličinu spalné teplo změříme v kalorimetru a výhřevnost z ní vypočteme odečtením kondenzačního tepla vody obsažené ve spalovaném materiálu jako vlhkost, tak i vody coby reakčního produktu vzniklého oxidací vodíku vázaného ve sloučeninách chemickou vazbou a stanoveného elementární analýzou.

Z praktického hlediska je významná výhřevnost, která neobsahuje kondenzační teplo vody ani z vlhkosti, ani z elementárního vodíku. Výjimku tvoří např. kondenzační kotle, které veškeré kondenzační teplo vody využijí.

Spalné teplo je měřeno v analyticky čisté, kyslíkem natlakované (často na 30 bar) bombě, tedy za konstantního objemu nebo tlaku.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro správný výpočet výhřevnosti je nezbytné znát vlhkost a elementární analýzu paliva, hlavně pak vodík H, síru S, dusík N a kyslík O, přičemž nejdůležitější je vlhkost a obsah vodíku H. Obsah síry, dusíku a kyslíku pak lze při výpočtu zanedbat - korekce na S, N a O většinou tvoří setiny MJ/kg.

Běžně se ke každému materiálu, palivu elementární analýza nevyžaduje, ale pro jednotlivé typy materiálu se počítá s dlouhodobými průměry analýz naměřených dříve.

2.1.2 Výpočet výhřevnosti paliva

Výhřevnost za konstantního tlaku a změřené vlhkosti je popsána následujícími rovnicemi. Podrobnější informace jsou obsaženy v normě ČSN EN 15400 Tuhá alternativní paliva – Stanovení spalného tepla a výhřevnosti.

Výhřevnost za konstantního tlaku pro suchý materiál je vyjádřena:

$$q_{p,net,m} = q_{v,gr,d} + 6,15 \cdot w(H)_d - 0,8 \cdot [w(O)_d + w(N)_d] - 218,3 \cdot w(H)_d \quad (2.1)$$

$$q_{p,net,m} = q_{v,gr,d} - 218,3 \cdot w(H)_d - 0,8 \cdot [w(O)_d + w(N)_d] \quad (2.2)$$

Výraz $0,8 \cdot [w(O)_d + w(N)_d]$ v rovnicích (2.1) a (2.2) může být zanedbán, blíží-li se nule, tzn., že suma kyslíku a dusíku v elementární analýze je menší než 10%.

Výpočet výhřevnosti $q_{p,net,ar}$ za konstantního tlaku o naměřené vlhkosti M (vlhkost přijatého materiálu M_{ar}):

$$q_{p,net,m} = \{q_{v,gr,d} - 221 \cdot w(H)_d - 0,8 \cdot [w(O)_d + w(N)_d]\} \cdot (1 - 0,01M) - 24,43M \quad (2.3)$$

$$q_{p,net,m} = \{q_{p,net,d} \cdot (1 - 0,01M) - 24,43M \quad (2.4)$$

Entalpie vypařování vody při konstantním tlaku a teplotě 25 °C je 44,01 kJ/mol. Toto odpovídá 218,3 J/g obsahu 1% vodíku ve vzorku paliva nebo 24,43 J/g pro 1% vlhkost.

Poznámka 1 $[w(O)_d + w(N)_d]$ může být odvozeno od odečítání od 100 % popela, uhlíku, vodíku a síry.

Poznámka 2 výhřevnost za konstantního objemu, tedy podmínek izochorických, je popsána následující rovnicí:

$$q_{p,net,m} = [q_{V,gr,d} - 206 \cdot w(H)_d \cdot (1 - 0,01M) - 23,0M] \quad (2.5)$$

2.1.3 Testovací zpráva

Testovací zpráva má přesně specifikovat podmínky, za nichž proběhlo měření, z důvodů umožnění opakování měření a tedy kontroly naměřených hodnot.

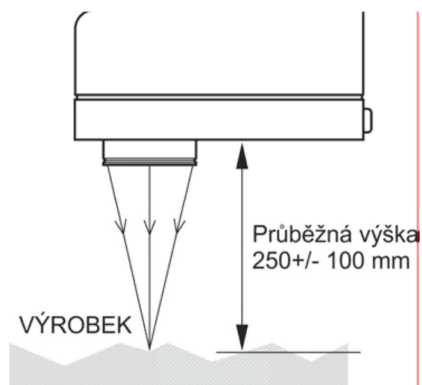
Tato testovací zpráva by měla obsahovat tyto informace:

- a) Popis provedení laboratorního testu včetně data provedení.
- b) Popis testovaného vzorku.
- c) Uvedení evropského nebo jiného standardu, podle kterého je test prováděn, např. EN 15400.
- d) Výsledek testu s uvedením parametrů, např.:
 - * Spalné teplo (gr), za konstantního objemu (V), suchého paliva (d) = $(q_{V,gr,d})$.
 - * Výhřevnost (net), za konstantního tlaku (p) suchého paliva (d) = $(q_{p,net,d})$.
 - * Výhřevnost (net), za konstantního tlaku (p) vlhkého paliva (ar) = $(q_{p,net,ar})$.
- e) Hodnoty vodíku, kyslíku, dusíku, síry, chloru použité pro výpočet spalného tepla a výhřevnosti.
- f) Jakékoli neobvyklé jevy zaznamenané během stanovení.

2.2 Hygrometr IR 5000

2.2.1 Nepřetržité měření vlhkosti

Stanovení vlhkosti spalovaného materiálu je pro výpočet výhřevnosti klíčové. Také se ale ukazuje, že je možné v případě konstantního paliva přibližně určit výhřevnost podle vlhkosti. Proto byl nad pás dopravující vyrobené palivo umístěn měřič vlhkosti. Pro tento technický účel se nejlépe hodí přístroj založený na změnách IR paprsků odražených od materiálu. Přístroj generuje tzv. blízké infračervené záření (NIR, 5000 nm) a měří a matematicky zpracovává paprsek odražený od vlhkého materiálu.



Obr. 2.1 Hygrometr IR 5000 [25]

Každý hygrometr IR 5000 (obr. 2.1) je optimalizován pro svůj určený účel, tj. přizpůsoben okolí, aby mohl vykonávat požadovaný proces měření. Hygrometr IR 5000 je koncipován pro použití v průmyslovém provozu a pokrývá široké spektrum produktů.

2.2.2 Princip měření

Přístroj absorbuje blízké infračervené světlo (NIR) na určitých, na materiálu závislých vlnových délkách. Hygrometr IR 5000 vyzařuje NIR světlo při těchto vlnových délkách a měří vzápětí přesně tu část, odrážející se od výrobku. Na základě této části se generují vydáváním, která jsou přímo úměrná k části každé naměřené součásti výrobku. Hodnota vlhkosti je zobrazena na displeji (viz obr. 2.2) a přes přenosovou síť se dále sdílí.

Měřicí hlavou se interně vykonávají veškerá měřicí a zpracovávací funkce a tato přímo dodává kalibrované hodnoty. Měřicí hlavou se také generují indikace, zobrazené na stanici HMI (Human machine interface).

Stanice HMI poskytuje přístup k monitorovací úrovni v rámci sítě. Ovládací a zobrazovací plocha je barevná dotyková obrazovka. Počáteční strana stanice HMI je obvykle konfigurovaná pro zobrazení naměřených hodnot v reálném čase.



Obr. 2.2 Naměřená hodnota vlhkosti na přístroji hygrometr IR 5000 [25]

2.3 Měření termo (IR) kamerou

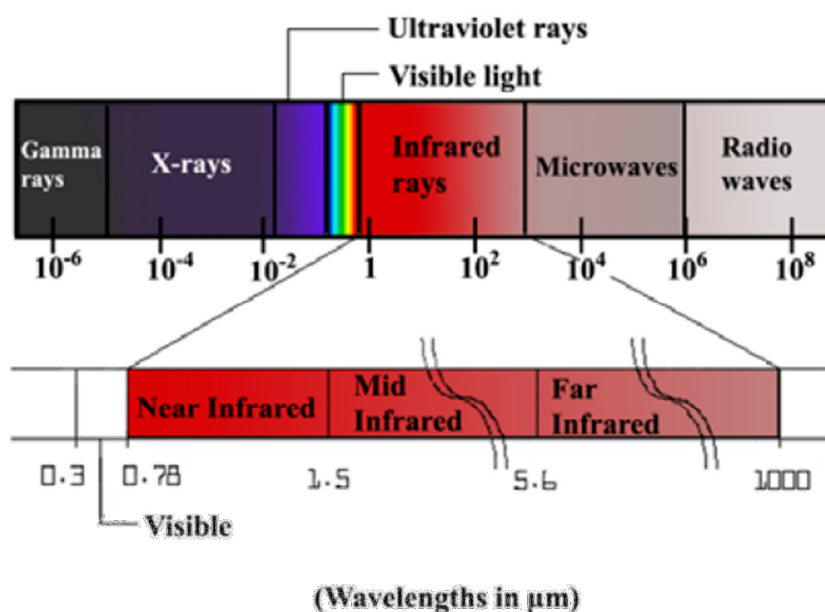
2.3.1 Infračervené záření

Infračervené záření je část spektra elektromagnetického záření od gama přes Rentgenové viditelné a mikrovlnné záření až po radiové vlny.

Všechny tyto typy záření, které společně tvoří elektromagnetické spektrum, jsou podobné v tom, že vydávají energii ve formě elektromagnetických vln, pohybujících se rychlostí světla.

Hlavní rozdíl mezi každým "pásmem" ve spektru je v jejich vlnové délce, která koreluje v závislosti na množství energie, které vlny nesou. Například, zatímco gama paprsky mají vlnové délky milionkrát menší než viditelné světlo, rádiové vlny mají vlnové délky, které jsou miliardkrát delší než ty viditelného světla.

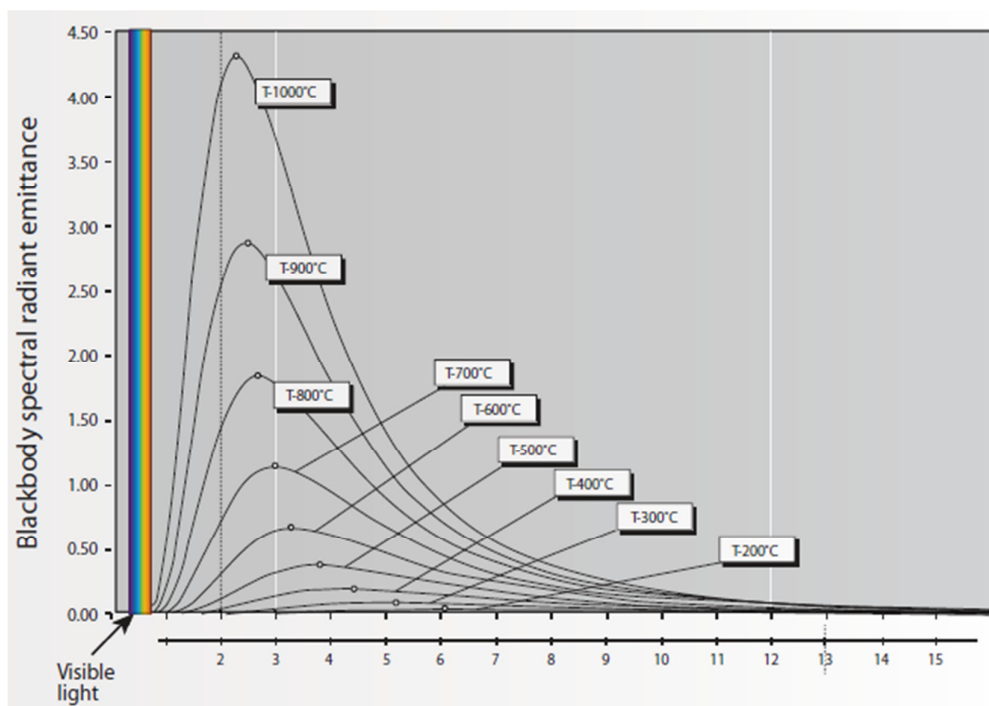
Vlnová délka infračerveného záření je od 0,78 μm do 1000 μm . To znamená, že je delší než vlnová délka viditelného světla, ale kratší, než mají rádiové vlny. Vlnové délky infračerveného záření, se zařazují z blízké infračervené do daleko infračervené (obr 2.3).



Obr. 2.3 Spektrum elektromagnetického vlnění. Zleva: γ -záření, rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné světlo, infračervené záření, mikrovlnné záření a radiové vlny

Infračervené záření je energie vyzařovaná pohybem atomů a molekul na povrchu objektu, kde je teplota vyšší než absolutní nula. Intenzita emitace je funkcí teploty materiálu. Jinými slovy, čím vyšší je teplota, tím vyšší je intenzita infračerveného záření, které je vyzařováno.

Stejně jako materiály vyzařují infračervené záření, tak je také odrážejí, absorbují a v některých případech přenášejí. Toto se nazývá emisivita materiálu [26].



Obr. 2.4 Emisivita absolutně černého tělesa v závislosti na teplotě povrchu

2.3.2 Základní vztahy

Emisivita tělesa je definována jako poměr zářivé energie vyzařované tělesem ku záření, které by bylo emitováno v absolutně černém tělesem při stejné teplotě:

$$\varepsilon = \frac{W_o}{W_{bb}} \quad (2.6)$$

Energie vyzářená z absolutně černého tělesa je popsána Planckovým zákonem spektrálního rozdělení monochromatického vyzařování černého tělesa [27] jako:

$$W_\lambda = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot T}} - 1)} \quad (2.7)$$

Použitím Planckova zákona lze vypočítat celkovou vyzařovanou energii. Je vyjádřena Stefan-Boltzmannův zákonem:

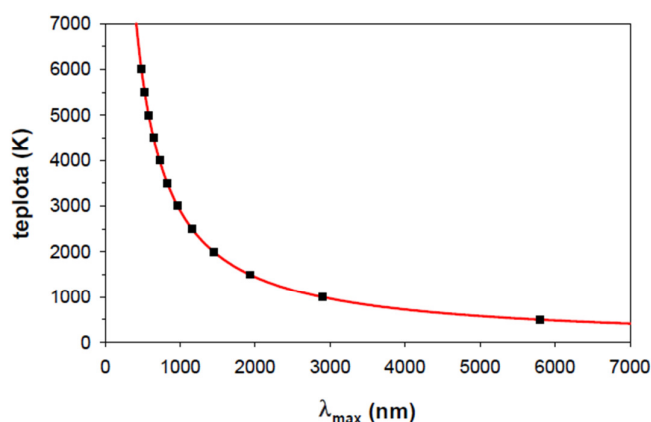
$$W = \sigma \cdot T^4 \quad (2.8)$$

Pokud spektrální emisivita povrchu závisí na vlnové délce jen zanedbatelně, jedná se prostě o emisivitu ε a těleso je označováno jako tzv. šedé. Platí pro ně upravený Stefanův Boltzmannův zákon ve tvaru:

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.9)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (2.10)$$

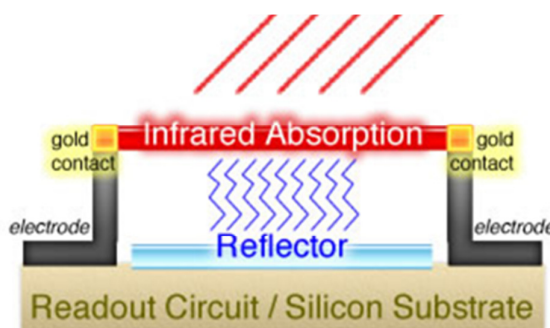
Z Planckova zákona odvozená rovnice (2.10) vyjadřuje tzv. Wienův posunovací zákon, který konstatuje, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje (tj. čím teplejší je těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách, tj. vyšších frekvencích).



Obr. 2.5 Wienův posunovací zákon

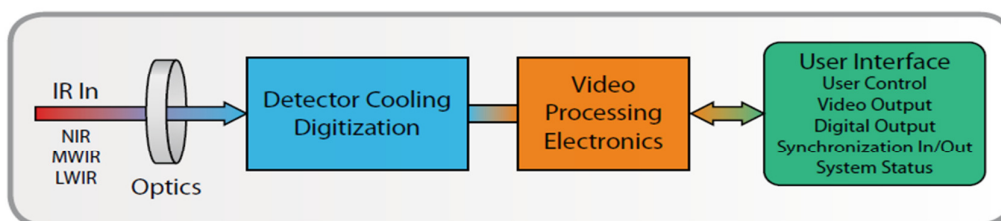
2.3.3 Princip zobrazení teploty

Všechny materiály, které mají teplotu nad 0 K (-273°C) vyzařují infračervené záření. Ačkoli infračervené záření (IR) není zjištělné lidským okem, IR kamerou ho lze převést do vizuálního zobrazení, které znázorňuje teplotní výkyvy v objektu. Infračervené záření emitované z měřeného objektu je převedeno na elektrický signál senzorem, tzv. microbolometrem. Microbolometr je miniaturní snímač, který při dopadu tepla mění elektrický odpor, a tím vzniká tzv. termo obraz. IR pokrývá část elektromagnetického spektra přibližně 900 až 14.000 nm (0,9-14 mm). Tento obraz je zobrazen na displeji jako barevné spektrum.

Obr. 2.6 Zobrazení teploty
(Zdroj www.x20.org)

Konstrukce IR kamery je podobná jako digitální videokamera. Hlavní složkou je čočka, která se zaměřuje na IR detektor, což je ohniskové pole pixelů mikrometrové velikosti vyrobené z materiálů o různé citlivosti na IR záření. Rozlišení se může pohybovat od cca (160 × 120) pixelů do (1024 × 1024) pixelů. Nezbytnou součástí pro měření je elektronika a software pro zpracování a zobrazování signálů a obrazů.

IR kamery měří s přesností $\pm 1\%$ [28].



Obr. 2.7 Princip zobrazení infračervené ho záření. Záření prochází optikou do detektoru, kde je převedeno na elektrický signál. Tento signál je zobrazen jako barevné spektrum

2.4 Sušení

Vlhkost mokrého materiálu je kapalný adsorbát vázaný na jeho vnější a vnitřní (porézní materiály) povrch. Adsorbens s adsorbátem jsou obklopeny pouze plynnou fází a transport hmoty nastává pouze jedním směrem, a to do plynné fáze. Proces se nazývá sušení. Sušením se obvykle míní snižování koncentrace kapaliny ve směsi s pevnou látkou odpařováním na pevný produkt. Vlhký materiál obsahuje většinou poměrně malé množství kapaliny, přičemž těkavost kapaliny je řádově větší než těkavost pevné látky. Někdy však surovina před sušením nemá pevné skupenství, jako např. při výrobě sušeného mléka. Sušení bývá často poslední z výrobních operací, kterými prochází určitý produkt. Sušeným materiálem mohou být krystaly, granule, vločky, práškový materiál, desky nebo jiný kusový materiál, ale též pasta, suspenze, emulze nebo roztok. Někdy je nutné materiál sušit při úzce vymezených podmínkách (např. potraviny), jindy sušený materiál snáší extrémní podmínky jak mechanické, tak tepelné (některé anorganické materiály).

Odstraňovanou kapalinou je nejčastěji voda. Kapalina je buď vně pevného materiálu (např. krystalů), nebo zcela uvnitř (např. rozpouštědlo v desce polymeru) a obecně je částečně na povrchu a částečně uvnitř materiálu.

Sušení je velmi rozšířený proces a provádí se v sušárnách. Vzhledem ke značně rozmanitým požadavkům na sušený materiál existuje mnoho typů sušáren (v literatuře např. [] se udává existence 70 tříd a podtříd sušáren). Liší se především způsobem, jakým se dodává energie potřebná k sušení, a způsobem dopravy materiálu sušárnou. Nejčastěji materiál přijímá energii z horkého plynu, který proudí sušárnou a je ve styku se sušeným materiálem. Pak se jedná o konvekční sušárnu. Těchto sušáren je mnoho typů (fluidační, pneumatické, bubnové, pásové, skříňové, tunelové, turbínové, proudové, rozprašovací aj.). Jindy se energie dodává materiálu zvenčí jako v sušárnách kontaktních, radiačních, dielektrických či mikrovlnných. Z takové sušárny pak vystupují pouze páry vlhkosti, případně s inertním plynem. Doba sušení má rozsah od několika sekund v rozprašovacích sušárnách k nejvýš jedné hodině v bubnových sušárnách a k několika hodinám až dnům v tunelových či pásových sušárnách.

2.4.1 Způsoby kontaktu plynu se sušeným materiálem

V konvekčních sušárnách se suší jak velké kusy materiálu, jako jsou keramické produkty či desky polymerů, tak i zrnitý materiál. Sušení se provádí rozličnými způsoby znázorněnými na obr. 2.8:

- a) Sušící plyn proudí podél povrchu vrstvy, pevné desky či filmu buď z jedné strany, nebo z obou stran.
- b) Sušící plyn proudí vrstvou hrubších částic sušeného materiálu uloženého na sítu.
- c) Částice materiálu padají proudícím plynem (např. v šikmém válci s vestavbami). Podobně jako při způsobech a) a b) je proudění plynu pomalé, aby se jím neunášel sušený materiál.
- d) Sušící plyn prochází vrstvou zrnitého materiálu rychlostí větší, než je prahová rychlost fluidace. Plyn odcházející z fluidní vrstvy obsahuje určitý podíl sušeného materiálu, který se zachycuje v cyklónu nebo filtru zařazeném za sušárnou.

e) Částice materiálu jsou sušeny a zároveň transportovány plynem, který má rychlost větší, než je prahová rychlost úletu.

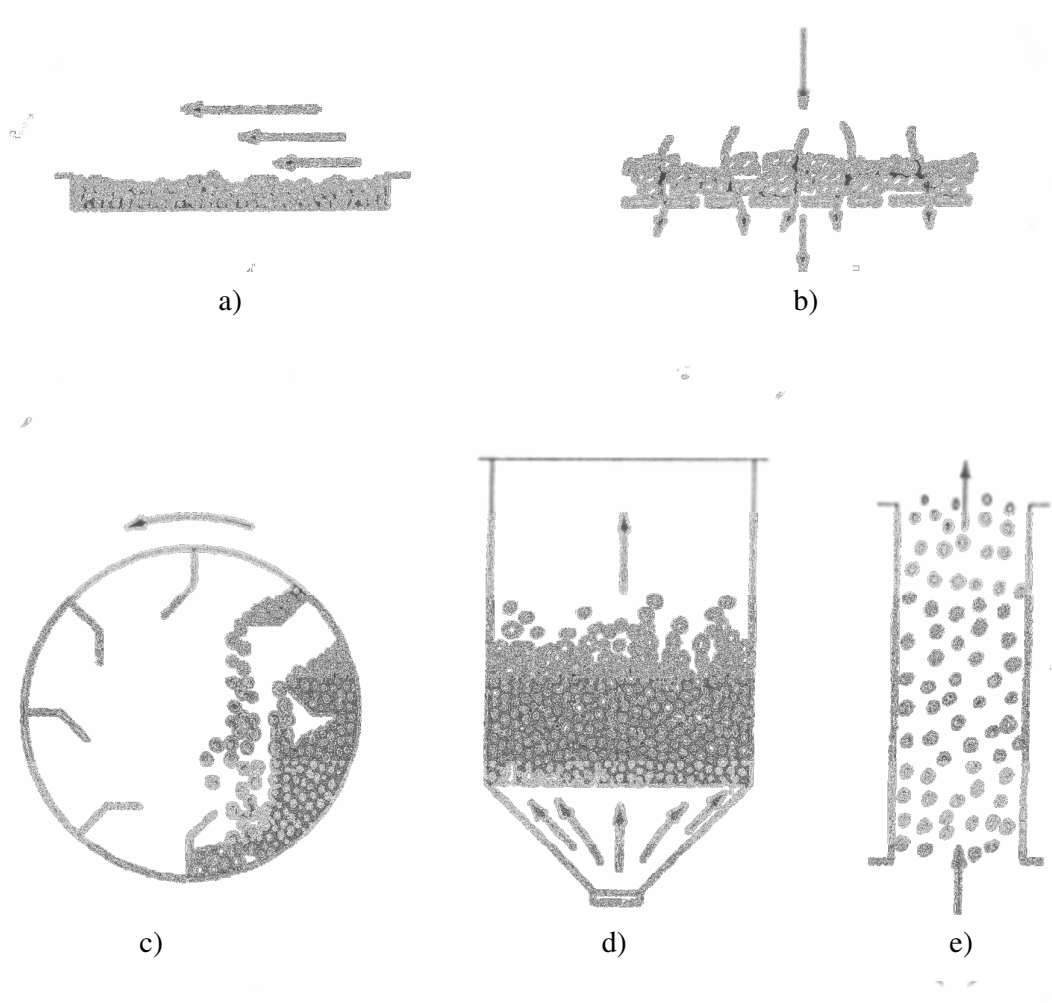
Konvekční sušárny jsou vybaveny tepelným výměníkem k zahřívání proudícího plynu.

Sušárny s nepřímým (vnějším) přívodem energie se liší především způsobem styku materiálu s teplosměnnou plochou:

a) Materiál se rozprostře po vodorovném povrchu, který je buď nehybný, nebo se pomalu pohybuje. Teplosměnný povrch se vyhřívá elektricky nebo kondenzující párou či horkou vodou. Materiál se též zahřívá infračerveným nebo mikrovlnným zářením.

b) Materiál se pohybuje po vyhříváném, obvykle válcovém povrchu (válcové sušárny) buď pomocí míchadla, nebo např. šnekového dopravníku.

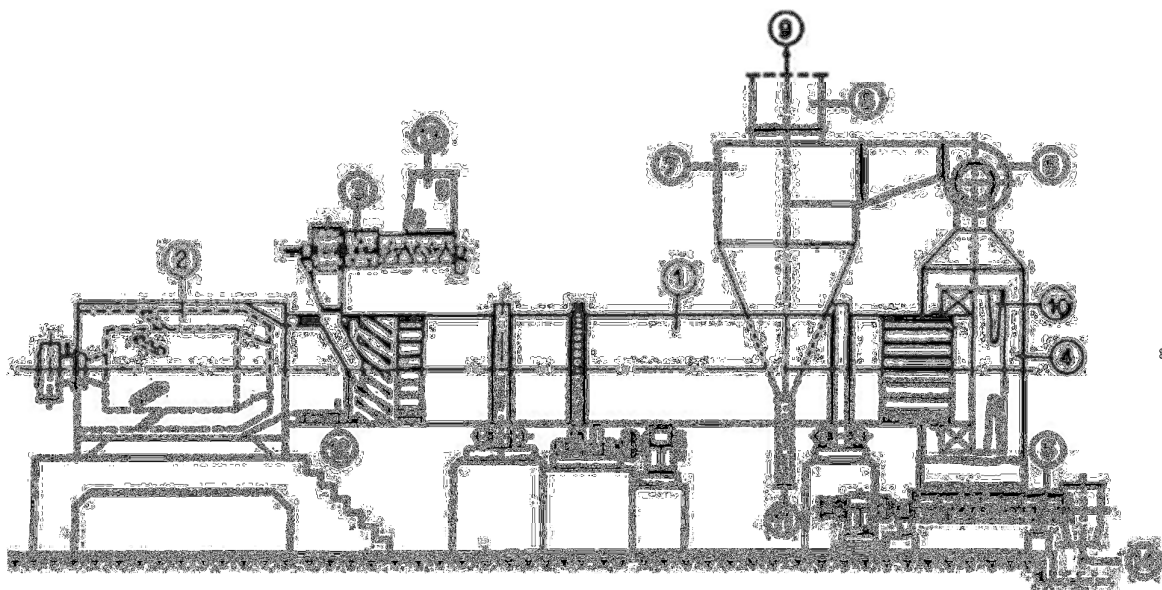
c) Materiál klouže vlivem tíže po šikmém vyhříváném povrchu. [29].



Obr. 2.8 Způsoby kontaktu plynu se sušeným materiálem [29].

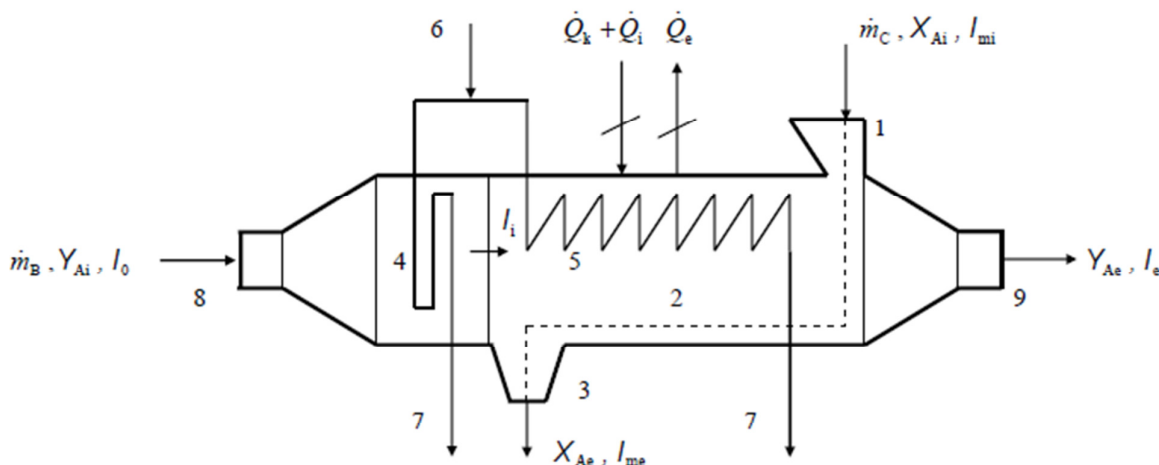
2.4.2 Bubnová sušárna

Bubnová sušárna (obr. 2.9), jejíž hlavní součástí je válec (buben) s mírně skloněnou podélnou osou uložený na nosných a opěrných kladkách. Buben se otáčí kolem své osy a frekvenci jeho otáčení lze v určitém rozmezí měnit. Vlhký materiál se dávkuje do vyššího konce bubnu a odtamtud rotací a působením vestavby bubnu a proudění sušicího plynu postupuje složitým pohybem směrem k dolnímu konci bubnu (doba prodlení materiálu v sušárně bývá 5 až 90 min). Přitom se buď přímo stýká s horkým sušicím plynem, který odnáší vznikající páru, nebo se vyhřívá nepřímou a pára unikající ze sušeného materiálu se odvádí samotná nebo pomocí jiného plynu, popř. se oba způsoby kombinují. U sušárny konvekčního typu je sušicí plyn po průchodu zařízením veden do odlučovače, kde se oddělí unášené částice vysušeného materiálu. Uspořádání transportu plynu a materiálu může být souprroud nebo protiproud. Bubnových sušáren se používá především k vysoušení sypkých materiálů, které během sušení podstatně nemění své sypné vlastnosti. Pomocí vestaveb v bubnu lze sušit i materiály pastovité a lepidlo.



Obr. 2.9 Schéma bubnové sušárny pro kaly [30].

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1 . Buben sušárny | 8. Odvod brýd (vedlejší plynný nebo parní produkt tepelných procesů při průmyslové činnosti) |
| 2 . Hořák nebo ohřívák vzduchu | 9. Odtah |
| 3 . Doprava kalů | 10. Hradící zařízení |
| 4. Zásobník sušeného kalu | 11. Výpad prachu |
| 5. Šnekový vynašeč suchého kalu | 12. Napojení zdroje tepla k bubnu |
| 6. Ventilátor | 13. Zásobník odvodněného kalu |
| 7.Odlučovač prachu | |
| 14. usušený granulát | |



Obr. 2.10 Schéma kontinuálně pracující bubnové sušárny při protiproudu materiálu a plynu [30].

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. Násypka (vstup mokrého materiálu) | 5. Vyhřívání sušárny |
| 2. Sušicí komora | 6. Přívod teplého vzduchu |
| 3. Výsypka (výstup vysušeného materiálu) | 7. Odvod kondenzátu |
| 4. Ohřev plynu | 8. Přívod vzduchu |

Intenzita hmotnostního toku sušícího plynu v bubnové sušárně závisí na prašnosti materiálu a pohybuje se od hodnoty $2 \cdot 10^3$ do $2 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, jeho teplota na vstupu do sušárny bývá 120 až 180 °C (pro vzduch ohříváný párou) nebo 540 až 820 °C (kouřové plyny). Průměr bubnu je od 1 do 3 m a obvodová rychlost bubnu je od 20 do 25 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$.

2.4.3 Bilance hmotnosti a entalpie při nepřetržitém sušení

Sušárna pracuje ustáleně při protiproudu sušeného materiálu a sušícího plynu. Bilance vlhkosti je:

$$\dot{m}_B \cdot (Y_{Ae} - Y_{Ai}) = \dot{m}_C \cdot (X_{Ai} - X_{Ae}) = \dot{m}_A \quad (2.11)$$

kde \dot{m}_B je hmotnostní tok sušícího plynu, Y_A hodnota vlhkosti sušícího plynu, \dot{m}_C hmotnostní tok sušeného materiálu X_A hodnota vlhkosti materiálu a \dot{m}_A hmotnostní tok vysušeného materiálu.

Před vstupem do sušárny se sušící plyn ohřívá ve výměníku. Bilance entalpie se napíše jednak pro výměník, jednak pro vlastní sušárnu. Hodnota Y_A se nemění a bilance entalpie je:

$$\dot{m}_B \cdot h_0 + \dot{Q}_k = \dot{m}_B \cdot h_1 \quad (2.12)$$

Z toho se vyjádří změna relativní měrné entalpie plynu z původní hodnoty h_0 na hodnotu h_1 na výstupu z výměníku, tj. před vstupem do sušárny:

$$h_1 - h_0 = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{m}_B} \quad (2.13)$$

Veličina \dot{Q}_k je tepelný příkon. Veličina \dot{Q}_i je případný dodatečný tepelný příkon a \dot{Q}_e jsou ztráty. Pro vlastní sušárnu je balance entalpie:

$$\dot{m}_B \cdot (h_e - h_1) = \dot{m}_C \cdot (h_{mi} - h_{me}) + \dot{Q}_i - \dot{Q}_e \quad (2.14)$$

K popisu sušení se zavádí ještě takzvaný měrný výsledný tepelný příkon \dot{q} :

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}_k + \dot{Q}_i - \dot{Q}_e}{\dot{m}_A} \quad (2.15)$$

2.5 Výměníky tepla

2.5.1 Účel výměníku tepla

Přenos tepelné energie na vytápění, technologický ohřev nebo na výrobu elektrické energie se odehrává v tepelných systémech, které nazýváme výměníky tepla. Jsou to zařízení pro uskutečnění průběžného nebo přerušovaného přenosu tepelné energie mezi dvěma nebo více proudícími teplonosnými médii. Dochází zde k předávání tepla z teplého (ohřívacího) média do média chladnějšího (ohřívajícího).

Při návrhu výměníků je jedním z hlavních požadavků co nejintenzivnější předání tepla při nízkých nákladech. Intenzivního přestupu tepla můžeme dosáhnout volbou vhodného materiálu pro konstrukci výměníku, konstrukčními úpravami a volbou vhodného pracovního média, [31].

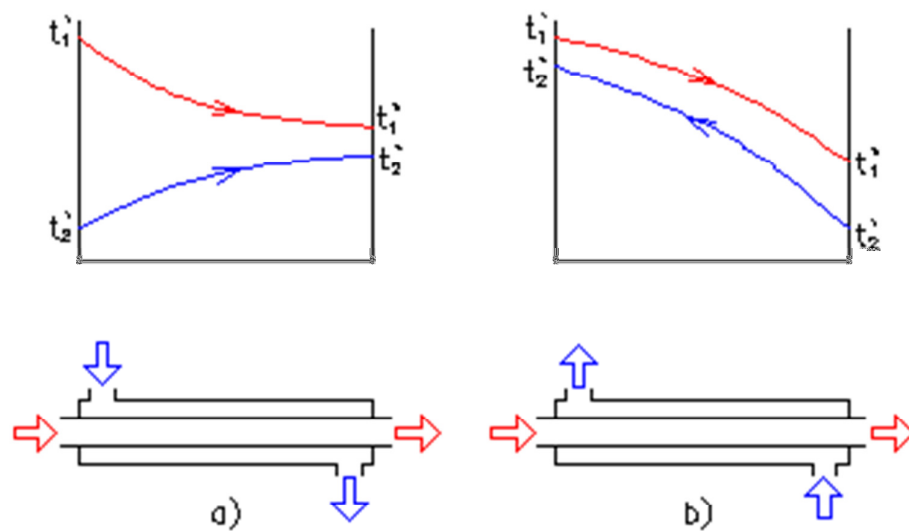
2.5.2 Rozdělení výměníků

2.5.2.1 Podle vzájemného proudění médií

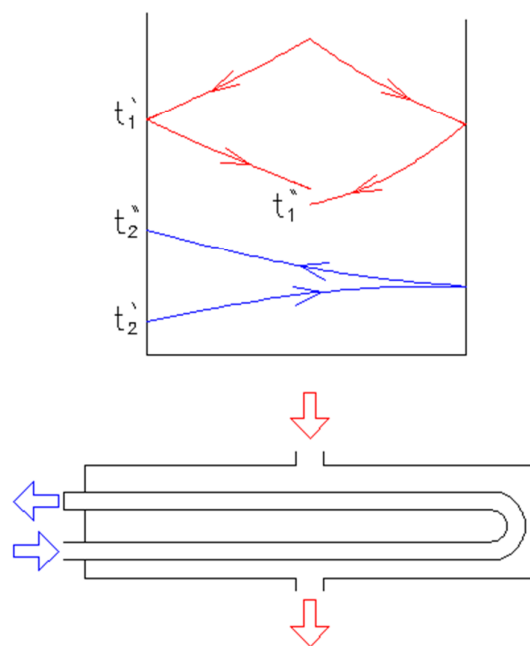
Souproudé – směry proudů médií jsou rovnoběžné a mají stejný smysl. Princip je zobrazen na (obr. 2.11a).

Protiproudé – směry proudů médií jsou rovnoběžné, ale mají opačný smysl. Princip protiproudého výměníku je zobrazen na (obr. 2.11b).

Křížové – osy proudů jsou mimoběžné a svírají spolu v kolmém průmětu úhel 90° . Princip výměníku je zobrazen na (obr. 2.12).



Obr. 2.11 Průběhy teplot u výměníků s uspořádáním: a) souproud, b) protiproud



Obr. 2.12 Průběhy teplot u výměníků s křížovým uspořádáním

2.5.2.2 Podle způsobu předávání energie

Rekuperační – obě pracovní látky ve výměníku jsou nepropustně odděleny stěnou, která tvoří teplosměnnou plochu.

Regenerační – obě média se v pracovním prostoru střídavě vyměňují, přičemž přenos tepelné energie se uskutečňuje pomocí akumulace energie v teplo zprostředkujícím elementu.

Kontaktní – obě média se v pracovním prostoru promíchávají a předají si tepelnou energii, následně jsou od sebe odděleny. Teplosměnná plocha je v tomto případě dána povrchem částic pevné fáze.

Směšovací – výměník nemá teplosměnné plochy. Ohřívací i ohřívané médium se smíchají a vytvoří homogenní směs [31].

2.5.2.3 Podle způsobu přenosu tepla

Konvekční – o předaném teple rozhoduje hlavně proudící médium.

Sálavé (radiační) – většina tepla se předává sáláním.

Kombinované – dochází k přenosu tepla prouděním i sáláním.

2.5.3 Způsoby sdílení tepla ve výměnících

Sdílení tepla je přenos vnitřní energie, která přechází samovolně od tělesa nebo látky s vyšší teplotou k tělesu či látce s nižší teplotou. Ke sdílení tepla může docházet třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekci) a sáláním (radiací) [31].

2.5.3.1 Sdílení tepla vedením (kondukcí)

Při tomto způsobu sdílení tepla se tepelná energie přenáší pouze v důsledku vzájemného kontaktu základních částic hmoty. Přenos energie probíhá od více energetických k méně energetickým částicím. U kapalin a plynů jsou to molekuly, u pevných látek pak atomy. Uplatňuje se přednostně v látkách pevného skupenství. V kapalinách a plynech bývá jeho význam druhořadý oproti konvekci. Velikost tepelného toku je charakterizována Fourierovým zákonem [31]:

$$dq = -\lambda \cdot \frac{dt}{d\delta} \quad (2.16)$$

2.5.3.2 Sdílení tepla prouděním (konvekci)

K tomuto způsobu sdílení tepla dochází při proudění tekutin a jejich kontaktu s okolními tuhými látkami (stěnami) s odlišnou teplotou. Přenos tepla konvekci je složen ze dvou mechanismů. První mechanismus je vedení (kondukce) a probíhá pouze v mezní vrstvě tekutiny, která bezprostředně přiléhá ke stěně. Druhý mechanismus probíhá tak, že mikročástice tekutiny jsou strhávány z volného proudu do mezní vrstvy, kde odebírají teplo a následně se vrací zpět, [32].

Konvekce se dělí podle typu proudění na:

- **nucenou** – k proudění dochází působením vnějšího činitele (např. čerpadlo, ventilátor),
- **přirozenou** – pohyb tekutiny je vyvolán rozdílem hustoty látky u teplosměnného povrchu a ostatním objemem tekutiny vzniklým v důsledku rozdílu teplot.

Pro přenášený měrný tepelný tok platí Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (t_1 - t_2) \quad (2.17)$$

Určení součinitele přestupu tepla α je obtížné. Závisí na mnoha faktorech jako druh tekutiny, rychlost a charakter proudění (laminární, turbulentní), typ proudění (přirozené nebo nucené), tvar a rozměry teplosměnných stěn, stav a vlastnosti tekutiny (teplota, tlak, hustota), teplotě stěny.

Tyto výpočty se provádí pomocí podobnostních, neboli kritériálních čísel:

Reynolds	$Re = \frac{w \cdot d_u}{\nu}$	(2.18)	vyjadřuje poměr setrvačných a třecích sil
-----------------	--------------------------------	--------	---

Prandtl	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}$	(2.19)	přenos hybnosti silami viskózními/transport tepla vedením (kondukcí)
----------------	---	--------	--

Nusselt	$Nu = \frac{\alpha \cdot d_u}{\lambda}$	(2.20)	je to poměr mezi přestupem a vedením tepla kondukcí do stěny
----------------	---	--------	--

Grashof	$Gr = \frac{g \cdot d_u^3 \cdot \gamma \cdot \Delta t}{\nu^2}$	(2.21)	porovnání Archimedovy síly (plovací) se silami vazkými
----------------	--	--------	--

2.5.3.3 Sdílení tepla sáláním (radiací)

Z každé látky vyzařuje nepřetržitě tepelná energie v podobě elektromagnetického záření. Pro přenos tepla je nejdůležitější infračervené záření s dlouhou vlnovou délkou, které se nazývá sálání. Zatímco přenos tepla vedením a konvekcí vyžaduje přítomnost hmotné látky, záření se může šířit i ve vakuu. Maximální tepelný tok, který může být vyzařován z povrchu, je dán Stefan- Boltzmanovou rovnicí $W = \sigma \cdot T^4$, [32].

2.5.4 Prostup tepla stěnou

Prostupem tepla je myšlen přenos tepelné energie mezi dvěma tekutinami oddělenými pevnou stěnou. Skládá se z přestupu tepla konvekcí na obou stranách stěny a vedení tepla stěnou. Uvažujeme prostupy rovinnou a válcovou stěnou.

2.5.4.1 Tepelný tok stěnou

$$\dot{q}_1 = \alpha_1 \cdot (t_1 - t_{s1}) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.22)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{s1} - t_{s2}) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.23)$$

$$\dot{q}_3 = \alpha_2 \cdot (t_{s2} - t_2) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.24)$$

$$\dot{q} = \dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.25)$$

Řešením těchto rovnic lze dojít ke vztahu

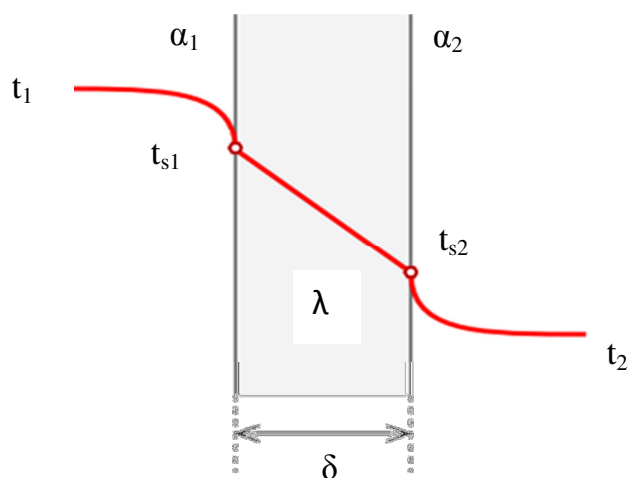
$$\dot{q} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.26)$$

Prostup tepla stěnou:

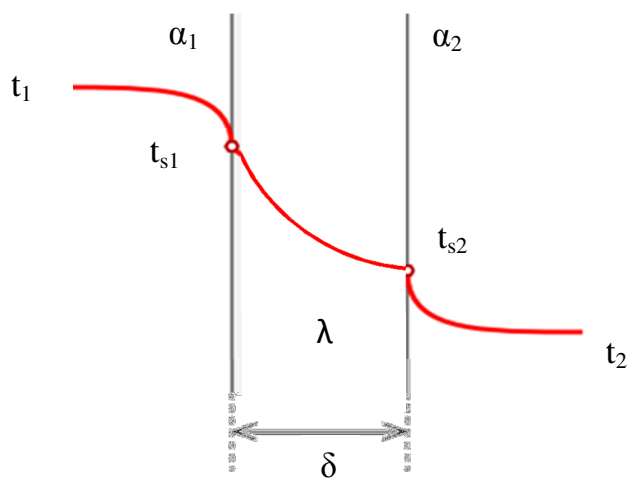
$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S \quad [\text{W}] \quad (2.27)$$

2.5.4.2 Prostup tepla válcovou stěnou

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.28)$$



Obr. 2.13 Prostup tepla rovinou stěnou [33]



Obr. 2.14 Prostup tepla válcovou stěnou [34]

2.6 Numerická metoda řešení

Cílem numerických metod pro řešení parciálních diferenciálních rovnic je hledat diskrétní řešení definované v dostatečně malých podoblastech základní oblasti pomocí soustavy tzv. algebraických rovnic. Základní vlastnosti numerických metod jsou:

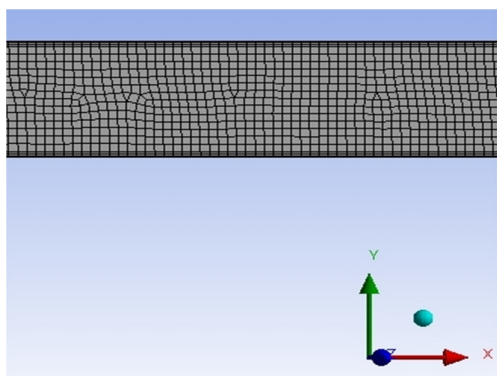
- míra přesnosti diskretizační chyby a residuálu (míra konvergence),
- míra stability.

Výpočty jsou provedeny v komerčním programu Fluent 6.1.12., který je založen na principu metody konečných objemů, s použitím modelu turbulence $k-\omega$.

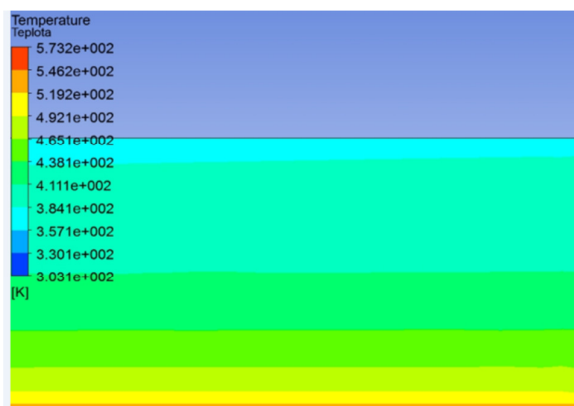
Metoda konečných objemů spočívá ve třech základních bodech:

1. rozdělení výpočtové oblasti na diskrétní (kontrolní) objemy (tvorba sítě),
2. bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech,
3. numerické řešení diskretizovaných rovnic.

FLUENT je moderní CFD program umožňující komplexní řešení úloh z oblasti proudění a spalování. Řešit je možno vnitřní i vnější obtékání v laminární i turbulentní oblasti, výpočty vícefázového proudění, proudění s volnou hladinou i chemickými reakcemi (například hoření) spolu s přenosem tepla. Program umožňuje jak stacionární, tak i nestacionární analýzu 2D i 3D problémů a následnou kvalitní vizualizaci výsledků. FLUENT lze použít pro modelování složitých procesů v energetice, chemickém inženýrství a v technice životního prostředí [35].



Obr. 2.15 Vytvoření sítě



Obr. 2.16 Fluent

2.6.1 Vytváření sítě

Numerická simulace proudění vyžaduje na počátku popis geometrie a vytvoření diskrétních nepřekrývajících se elementů – konečných objemů. V našem případě byl pro přípravu výpočetní sítě použit software GAMBIT 2.1.6.

2.6.1 Bilanční rovnice v obecném tvaru

Pro jakýkoliv kontrolní objem můžeme sestavit univerzální bilanci obecné fyzikální veličiny podle principu, který lze zapsat, [34]:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Rychlost} \\ \text{akumulace} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Rychlost} \\ \text{přívodu} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Rychlost} \\ \text{odvodu} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Rychlost} \\ \text{vzniku} \end{array} \right]$$

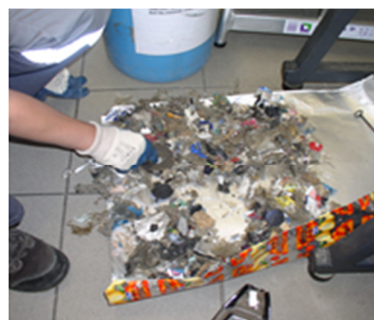
3 Experimentální část

3.1 Určení výhřevnosti paliva

3.1.1 Příprava vzorku a měření spalného tepla v palivu za konstantního objemu



Obr. 3.1 Dvoulitrový vzorek



Obr. 3.2 Kvartace



Obr. 3.3 Vážení vzorku

Alternativní palivo se vyrábí drcením z tříděného komunálního a průmyslového odpadu, který zákazníci dodají do společnosti ecorec.

Tříděný odpad se v drtící lince rozdrtí na velikost 40 mm. Poté je automatickou vzorkovací stanicí odebrán přibližně 2 litrový vzorek (obr. 3.1). Tento vzorek je redukován kvartací, tzn., že je rozdělen na čtyři přibližně stejné části, dva protilehlé díly jsou odebrány pro další měření a magnetem se odstraní veškerý zbývající feromagnetický kov (obr. 3.2). Polovina původního materiálu, již bez kovových částí, se vloží do nádoby a zváží se. Tím je získána tzv. litrová váha (obr. 3.3).

Litr vzorku je podrcen nahrubo na mlýnku Retsch se sítím 4 mm. Cca 1 g vzorku je přenesen na misku analyzátoru vlhkosti, kde je vysušen do konstantní váhy pod infračervenou lampou a je automaticky vypočteno procentuální množství vlhkosti ve vzorku (obr. 3.4).

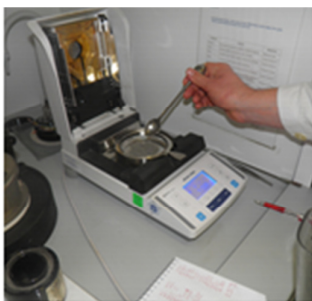
Poté se materiál vysuší ve fluidní sušárně vzorků (obr. 3.5). Doba sušení je závislá na obsahu vlhkosti podrceného materiálu. Při 15-30% vlhkosti se doba sušení pohybuje se mezi 10-20 minutami. Všechny vysušené materiály je následně rozdrcen v mlýnu na velikost 0 - 0,5 mm a shromažďován pomocí cyklonu ve sběrné nádobě (obr. 3.6 a 3.7).

Z 5,6 g práškovitého materiálu a 20 % přidaného pulverizovaného (práškového) vosku se po dokonalém rozmíchání vytlisuje na 20T lisu tableta (obr. 3.8). Ve vakuu jsou fluorescenčním spektrofotometrem Epsilon 5 změřeny elementy 3. a vyšší periody, tedy i síra potřebná pro přesný výpočet výhřevnosti, a nežádoucí těžké kovy.

Na ručním lisu je vytlisována cca 1g tableta o průměru 10mm (obr. 3.9). Tableta vzorku se přesně zváží na analytických vahách (obr. 3.10).

Takto zvážený vzorek se vloží do automatického kalorimetru (obr. 3.11), ze kterého se odečte hodnota spalného tepla (obr. 3.12).

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obr. 3.4 Určení procentuálního množství vlhkosti



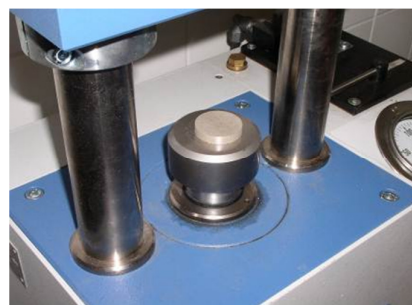
Obr. 3.5 Sušení vzorku



Obr. 3.6 Drcení vzorku



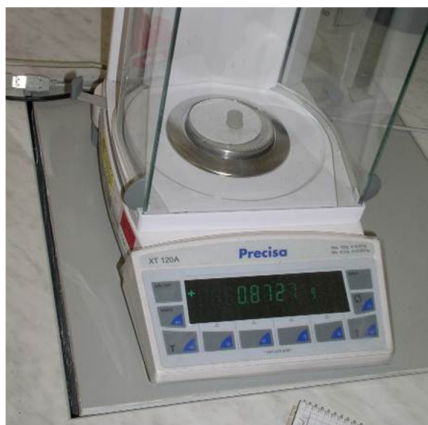
Obr. 3.7 Nadrčený vzorek



Obr. 3.8 Vylisovaná tableta z lisu



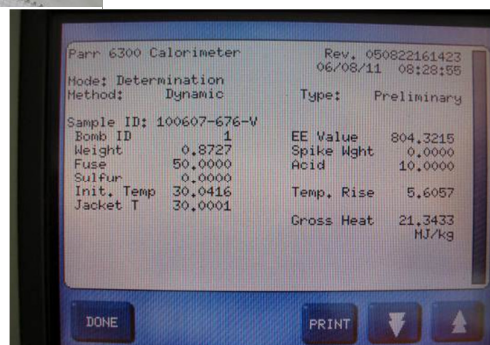
Obr. 3.9 Vylisovaná tableta z ručního lisu



Obr. 3.10 Přesné vážení vylisované tablety



Obr. 3.11 Kolorimetr



Obr. 3.12 Výsledné hodnoty

3.1.2 Automatizované měření v kalorimetru PARR 6300

Kyslíkový kalorimetr PARR 6300, ve kterém je nová technologie zkombinována s časovací technikou, vytvoří plně automatický systém umožňující měření spalného tepla pevných látek a kapalin, hořlavých odpadů, potravin a dalších v kyslíku hořlavých materiálů. Tento nový přístup k bombové kalorimetrii vyúsťuje ve významné zjednodušení kroků nezbytných k provedení kalorimetrického testu bez toho, aby docházelo ke kompromisům mezi požadavky na kompletní spálení, rychlým tokem tepla a přesnými teploměry, které jsou základem pro spalovací kalorimetrii.

Při isoperibolických činnostech je zásobník udržován na konstantní teplotě, zatímco teplo uvolněné při spálení vzorku způsobuje nárůst teploty bomby a pláště. Malé toky tepla mezi pláštěm a okolím během testu jsou monitorovány mikroprocesorem kalorimetru, který vyhodnocuje vliv ztrát tepla a automaticky zavádí potřebné korekce. Tento systém se tedy odlišuje od adiabatického systému, kde musí být teplota zásobníku neustále přestavována tak, aby sledovala teplotu pláště a byla tak zachována nulová difference mezi oběma teplotami, což zajišťuje, že nebude docházet ke ztrátám tepla mezi pláštěm a okolím, [36].

3.1.3 Pracovní postup stanovení spalného tepla kalorimetricky

Po otevření přívodu kyslíku se kalorimetr a vodní hospodářství zapojí do elektrické sítě a zapnou se. Z Menu se vybere program DETERMINATION a zapne se HEATING, až se zaktivuje tlačítko START. Na drátek spojující elektrody na víku kalorimetrické bomby se připevní speciální bavlněné vlákno.

Přesně zvážená tableta vzorku se umístí do spalné misky na zápalné vlákno upevněné na drátku mezi elektrodami. Prvním změřeným vzorkem je zvážená tableta kyseliny benzoové, kterou se ověří parametry kalorimetru. Změřené spalné teplo má být $26,454 \text{ MJ/kg} \pm 2 \%$. Při neshodě proběhne kalibrace přístroje a nové nastavení kalorimetrické konstanty.

Měření spalného tepla pevného vzorku se provede navážením z něho vylišované tablety (0,5 – 1,0 g) na analytických váhách, s přesností na desetiny miligramu. Tento vzorek se přemístí na spalnou misku upevněnou na stojanu víka bomby kalorimetru se zavedeným zápalným bavlněným vláknem nebo oleje (0,3 – 0,6 g) naváženého přímo na spalovací misce, která se poté přemístí na stojan víka kalorimetrické bomby a do kapaliny se vloží na drátku připevněné zápalné vlákno.

Neznámého vzorku se navažuje max. 0,3 g. Obsahuje-li kovy (hlavně Al, Zn,...), tyto se ze vzorku předem odstraní, aby nedošlo k poškození kalorimetru. Hlava kalorimetru se uzavře bajonetovým uzávěrem. Víko kalorimetru se uzavře a zajistí. Do výplachové nádoby se předloží 100 ml demineralizované vody a stiskne se tlačítko START.

Na dotykové obrazovce se napíše identifikace vzorku, údaje se potvrdí tlačítkem ENTER. Zadá se hmotnost měřeného vzorku, údaj se potvrdí tlačítkem ENTER.

Zapálení vzorku je oznámeno po natlakování analyticky čistým kyslíkem (99.995%) cca po 10 min. zvukovým signálem. Po dokončení měření (za cca 15 minut) se na displeji objeví naměřené hodnota, která se spolu s identifikačními údaji uloží do paměti kalorimetru. Po skončení měření se uzavře přívod kyslíku. Hlava i bomba se vyčistí papírovým ubrouskem, případně ethanolem. Kalorimetr a vodní hospodářství se vypnou, [31].

3.1.4 Vyhodnocení výsledků

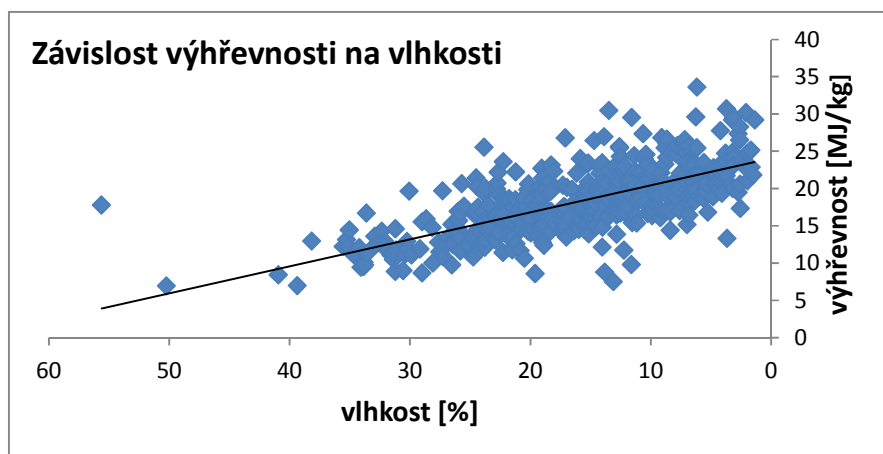
Z kalorimetru se naměřená hodnota pošle zmáčknutím tlačítka PRINT a potvrzením DONE do počítače, kde program ParrComm po vložení příslušných dat vypočte výhřevnost.

Z průměrné elementární analýzy je vložena hodnota uhlíku 55 %, vodíku 5,85 % a dusíku 0,1 %, hodnota síry je získána z rentgenu a vlhkost je naměřena dříve zmíněným analyzátelem vlhkosti. Je nutné zopakovat, že na hodnotu výhřevnosti mají hlavní vliv vlhkost a konstituční obsah vodíku, ostatní hodnoty hrají marginální úlohu.

Po ukončení měření se zobrazí hodnoty spalného tepla (obr. 3.13), které se ukládají spolu s vypočtenou výhřevností do databáze LIMS (Laboratory Information Management System). Hodnoty za rok 2012 byly vyneseny do grafu (graf 3.1). Kde je zobrazena lineární závislost výhřevnosti na vlhkosti. [31].



Obr. 3.13 Hodnoty spalného tepla



Graf 3.1 Graf závislost výhřevnosti na množství vlhkosti

3.2 Měření vyzařovaného tepla pomocí infrared (IR) kamery

3.2.1 Typ použité kamery

Pro měření byla použita IR kamera FLUKE Ti45. Tato kamera má vše potřebné pro prakticky každý úkol termografie. S detektorem o rozlišení 160 x 120 a teplotní citlivostí až do 0,08 °C (80 mK). Dodává obrázky ve vysokém rozlišení, kde jsou i ty nejmenší teplotní rozdíly vidět. Rozsah měřících teplot je od -20 °C do 600 °C.

Jednotka se velmi snadno používá díky systému Windows ® struktuře menu CE a



Obr. 3.14 Termokamera FLUKE Ti45

nabízejí rozšířené řešení problémů sadou funkcí. Kamera je také vybavena inovativní IR-Fusion ® technologií. IR-Fusion zachycuje ve viditelném světle obraz vedle infračerveného snímku a pomáhá tak s analýzou obrazu IR, [37].

3.2.2 Výběr vhodných míst pro odběr tepla

Jak bylo zmíněno na začátku, výroba cementu je vysoce energeticky náročná. Pro proces výroby slínku je potřeba dosahovat teploty až 1450 °C. A tímto procesem nevyhnutelně dochází k tepelným ztrátám.

Další specifickým problémem je velice abrazivní prostředí uvnitř potrubí. Proto bylo pro tento výzkum rozhodnuto umístit výměníky vně potrubí. Za využití IR kamery bylo zjišťováno, kde a kolik tepla uniká.

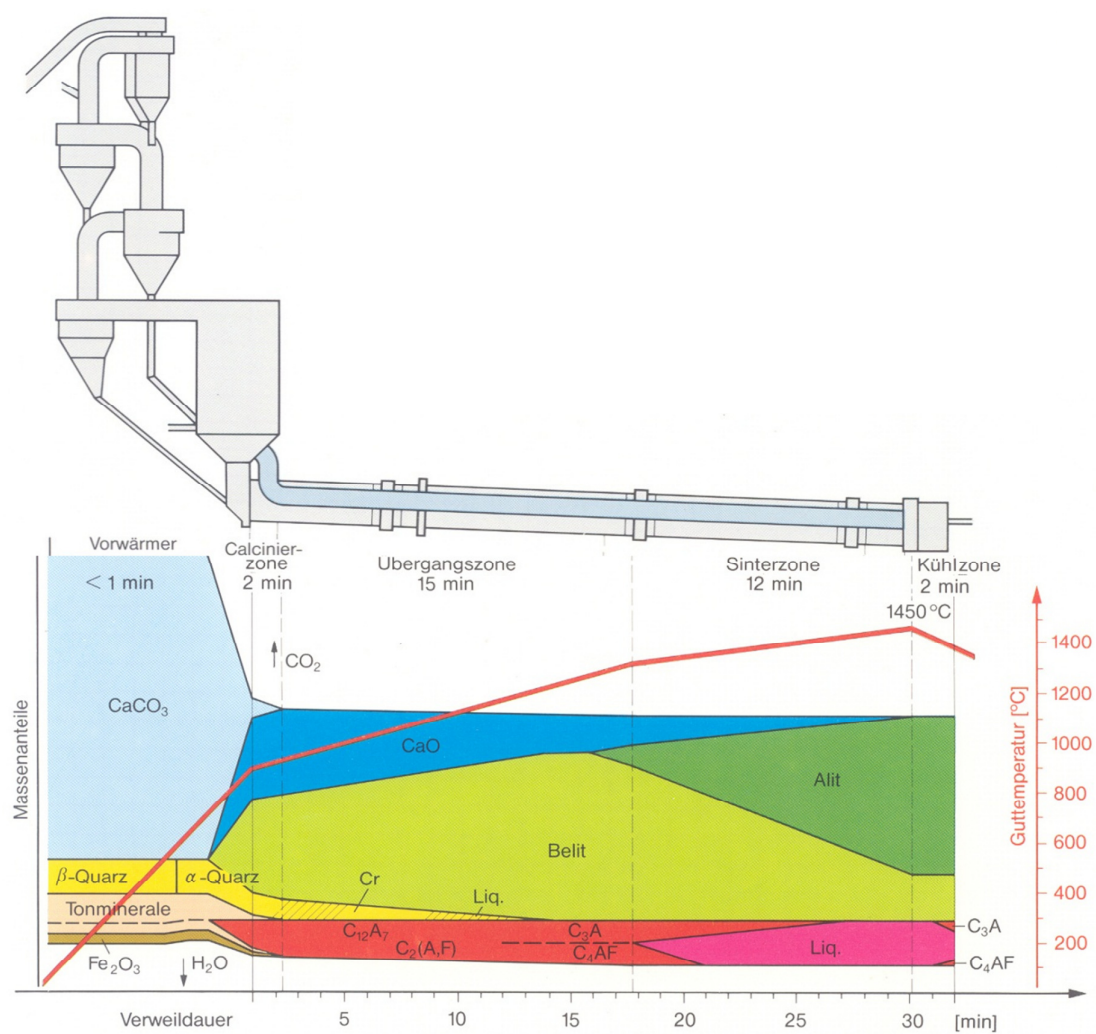
Nejprve v systému (viz obr. 3.15) probíhá ohřev a poté při následných teplotách dochází k:

- 20 – 100 °C vypařování vody H₂O,
- 100 – 300 °C ztrátě fyzikálně vázané vody,
- 400 – 900 °C ztrátě chemicky vázané vody (H₂O a OH skupiny) z jílových minerálů.

Při následujících teplotách dochází k:

- >500 strukturálním změnám v silikátových minerálech,
- 600 - 900 rozkladu uhličitánů,
- >800 tvorbě belitu, meziproduktů, aluminátů a feritu,
- >1250 tvorbě kapalné fáze (aluminát a ferit se taví),
- ~1450 finální reakci a růstu zrn alitu a belitu.

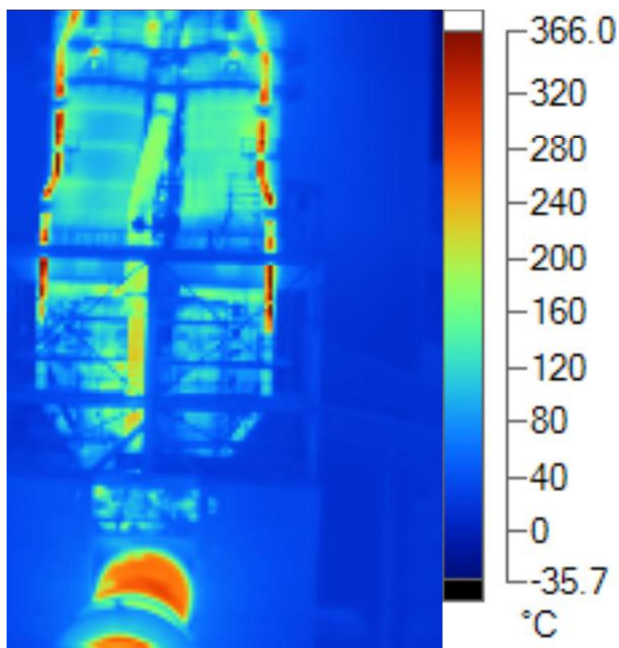
Při ≈ 800 °C se vápenec rozkládá na volné vápno a oxid uhličitý: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$



Obr. 3.15 Výroba slinku (Zdroj: Holcim)

3.2.3 Cyklónový výměník, předkalcinátor

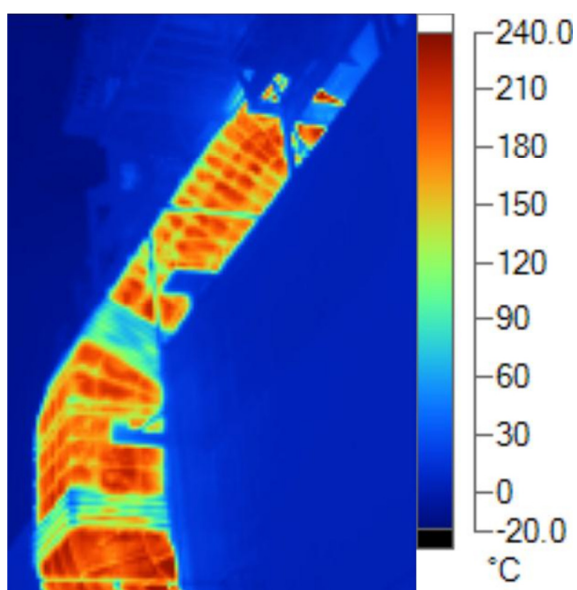
Nevýhodou tohoto odběrného místa (obr. 3.16) je velká vzdálenost od vstupu materiálu do hořáku a tudíž nutnost instalace a izolování potrubí s teplosměnnou látkou. Další nevýhoda je nutnost instalace výměníku ve značné výšce.



Obr. 3.16 Cyklónový výměník

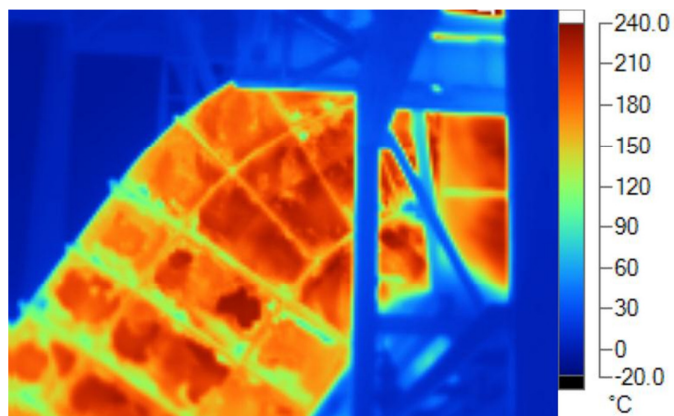
3.2.4 Odvod odpadního vzduchu z chladiče slinku

- Potrubí jdoucí vně budovy, celkový pohled



Obr. 3.17a Odvod odpadního vzduchu

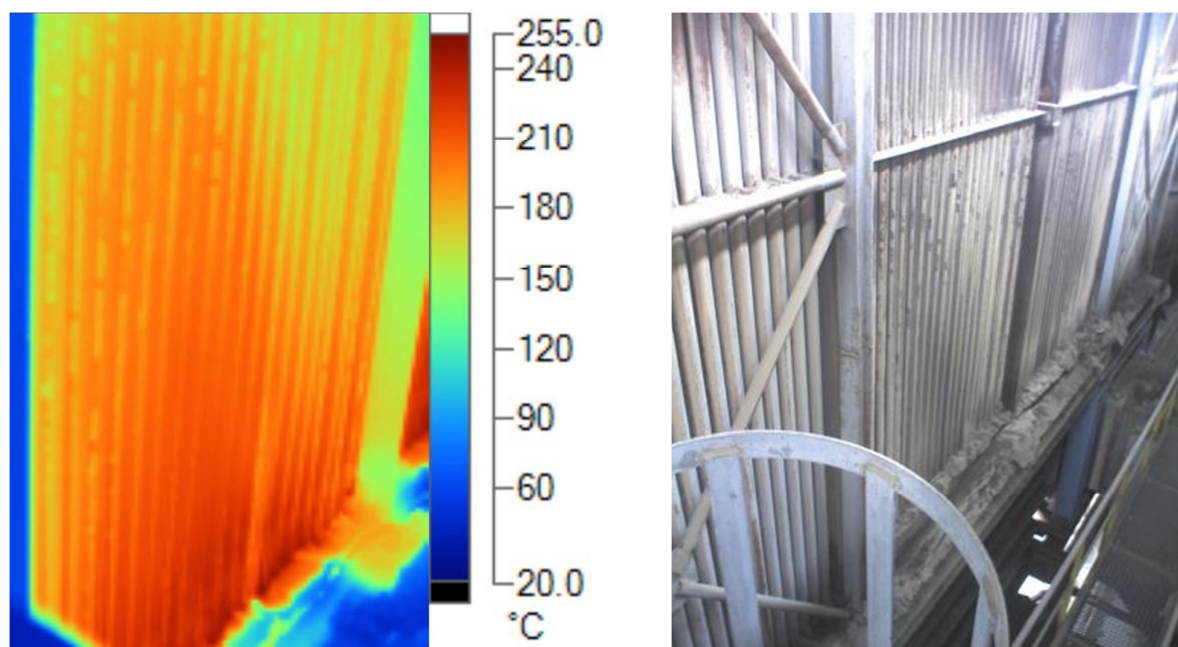
Výhodou tohoto odběrného místa (obr. 3.17) je vzdálenost od sušícího zařízení, která je mnohem kratší, než v předchozím případě. Nevýhodou je omezená velikost teplosměnné plochy, nutnost doplnění izolace po obvodu pláště a problémová instalace a údržba výměníku.



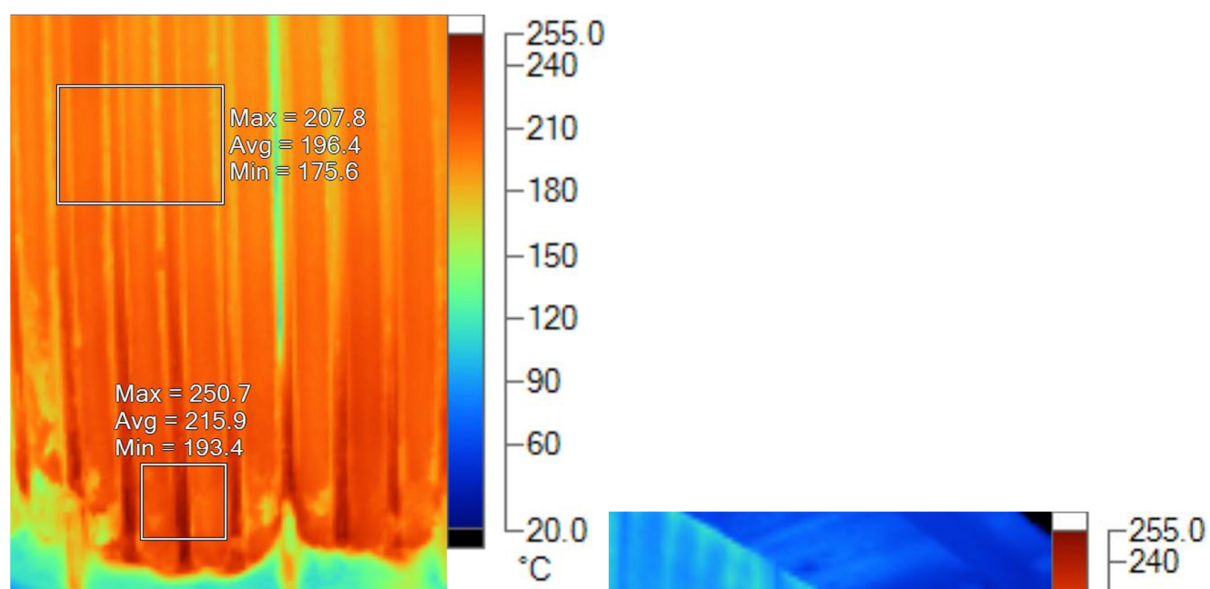
Obr. 3.17b Detailní snímek horní části potrubí



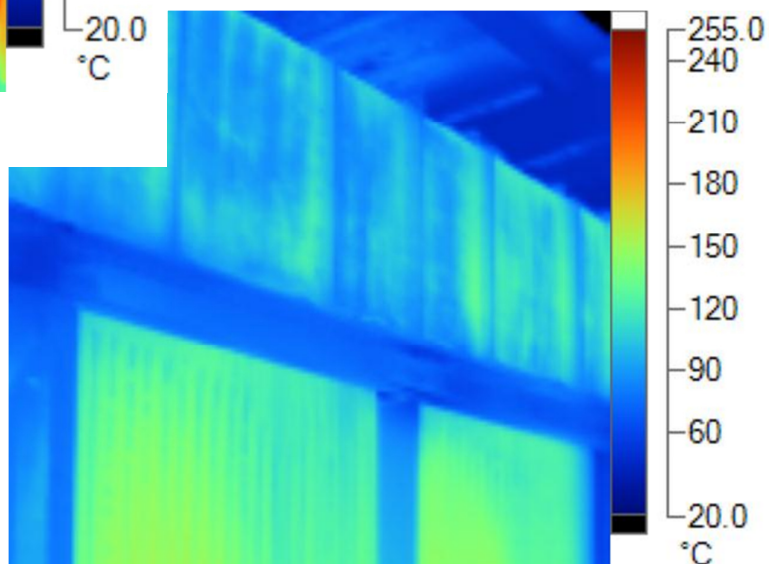
Obr. 3.18a Chladič odpadního vzduchu



Obr. 3.18b Teplotní profil chladiče odpadního vzduchu



Obr. 3.19 Maximální teploty



Obr. 3.20 Teplota vychlazeného odpadního vzduchu

3.2.5 Chladič odpadního vzduchu před vstupem do filtrů

Jako nejvhodnější se jeví odebrat teplo z chladiče odpadního vzduchu (obr. 3.18). V současné době se odpadní vzduch vede soustavou trubek a chladí se proudem odpadního vzduchu. Výstupní teplota odpadního vzduchu se pohybuje kolem 100 °C. V tomto prostoru je relativně dobrý přístup. Nabízí se také více variant, jak zde odpadní teplo odebrat. Jedna z variant je opláštění daného prostoru a odebrat teplo v existující zástavbě. Nebo provést zásah do konstrukce výměníku.

Teplota odpadního vzduchu vstupující do chladiče je (200 - 250) °C, viz obr. 3.19. Proudem chladícího vzduchu dochází k ochlazení na teplotu mírně přesahující 100 °C, aby nedošlo k poškození textilních filtrů (obr. 3.20).

3.3 Výpočet potřebného množství vzduchu k sušení

3.3.1 Zadání

Tato kapitola se zabývá statikou sušení spojené s výpočtem spotřeby sušícího vzduchu a základních rozměrů sušárny a pomocných zařízení. Tok sušeného materiálu je 20 000 kg/hod o počáteční vlhkosti 20%. Konečná vlhkost 10%.

3.3.2 Vlastnosti sušeného materiálu

Počáteční relativní φ_{1m} a konečná φ_{2m} vlhkost sušeného materiálu

$$\varphi_{1m} = 0,2 \qquad \varphi_{2m} = 0,1$$

Množství vody v sušeném materiálu

$$\dot{m}_{1w} = \dot{m}_c \cdot \varphi_{1m} \tag{3.1}$$

$$\dot{m}_{1w} = 4\,000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Množství vody v usušeném materiálu

$$\dot{m}_{2w} = \dot{m}_c \cdot \varphi_{2m} \tag{3.2}$$

$$\dot{m}_{2w} = 2\,000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Množství odpařené vody

$$\dot{m}_{2sw} = 2\,000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \tag{3.3}$$

Množství sušiny

$$\dot{m}_{2m} = \dot{m}_c - \dot{m}_{1w} \tag{3.4}$$

$$\dot{m}_{2m} = 16\,000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

3.3.3 Množství vzduchu potřebného k vysušení materiálu

Průměrná roční teplota vstupujícího vzduchu je 9 °C a relativní vlhkost 79%, z Molierova i-x diagramu zjistíme hodnotu entalpie $h_0=25 \text{ kJ/kg}$,

Teplota sušícího vzduchu je 80 °C. Této teplotě po ohřevu odpovídá relativní vlhkost 2,5%. Z Molierova i-x diagramu odečteme pro vlhkost 2,5% měrnou vlhkost $x_1=6$ g/kg.sv a entalpii $h_1=95$ kJ/kg

Je-li teplota vystupujícího vzduchu 30 °C, pak měrná vlhkost $x_2=22$ g/kg.sv. Množství sušícího vzduchu

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{air}} &= \frac{\dot{m}_{2\text{sw}}}{(x_2 - x_1)} \\ \dot{m}_{\text{air}} &= \frac{2000}{(0,022 - 0,006)} \\ \dot{m}_{\text{air}} &= 125000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}\end{aligned}\tag{3.5}$$

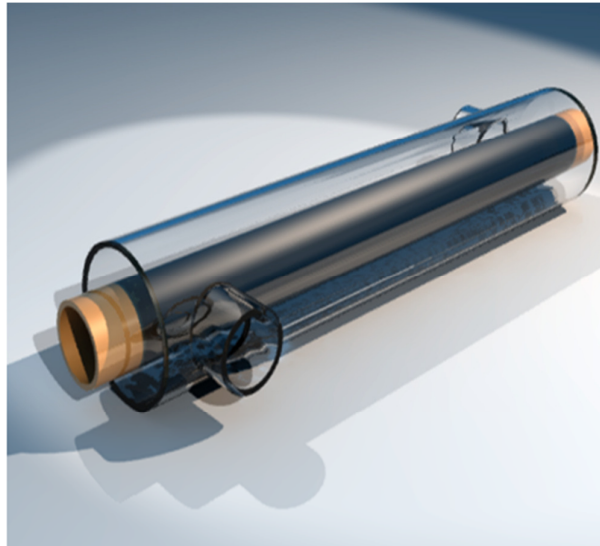
Tepelný tok potřebný na ohřev vzduchu

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{ov}} &= \dot{m}_{\text{air}} \cdot (h_1 - h_2) \\ \dot{Q}_{\text{ov}} &= 34,7 \cdot (98 - 25) \\ \dot{Q}_{\text{ov}} &= 2535 \text{ kW}\end{aligned}\tag{3.6}$$

3.4 Výpočet primárního výměníků:

3.4.1 Protiproudý trubkový výměník:

Trubkové výměníky jsou nejčastějším typem výměníků, který je vhodný i pro vysoké tlaky a teploty. Tyto typy výměníků jsou univerzální, použitelné pro kapaliny i plynu (včetně fázových změn, tj. jako vařáky a kondenzátory). Vzájemná orientace proudů se v jednotlivých partiích výměníku mění (někde je souproud, protiproud nebo křížový tok); záleží na vedení toku v mezitrubkovém prostoru – plášti, který může být rozdělen podélnými i příčnými přepážkami (segmentovými, diskovými, šroubovicovými, tyčovými). Směr proudění v trubkách se rovněž může měnit – jeho orientaci určují dělicí přepážky v rozdělovacích komorách – hlavách výměníku.



Obr. 3.21 Protiproudý výměník [38]

V návrhu pro tuto práci je uvažován protiproudý výměník olej – vzduch, vnější průměr trubky, z které je teplo odebráno 275 mm. Měřením bylo zjištěno, že povrch výměníku dosahuje teplot 250°C. Pro můj výpočet budu pracovat s teplotou povrchu 200°C. Vnitřní průměr trubky výměníku je 280 mm. V trubce proudí teplotonosná látka, v tomto případě olej. Samotný typ přenosu tepla je přímý kontakt oleje s horkým povrchem.

3.4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla oleje

V této části se vypočítává určující teplota pro výpočet kritériálních čísel a následnému určení součinitele přestupu tepla. Z tabulek [39] byly získány vlastnosti teplotního oleje při teplotě 115°C : $\lambda = 0,138 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $c_p = 2248,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\nu = 2,041 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho = 810,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; výměník trubka v trubce, průměr 275/280 mm, $\lambda = 58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Výpočet určující teploty

$$t_u = t_2'' = \frac{t_1' + t_2'}{2} \quad (3.7)$$

$$t_u = t_2'' = \frac{200 + 30}{2}$$

$$t_u = t_2'' = 115^\circ\text{C}$$

Výpočet středního logaritmického spádu

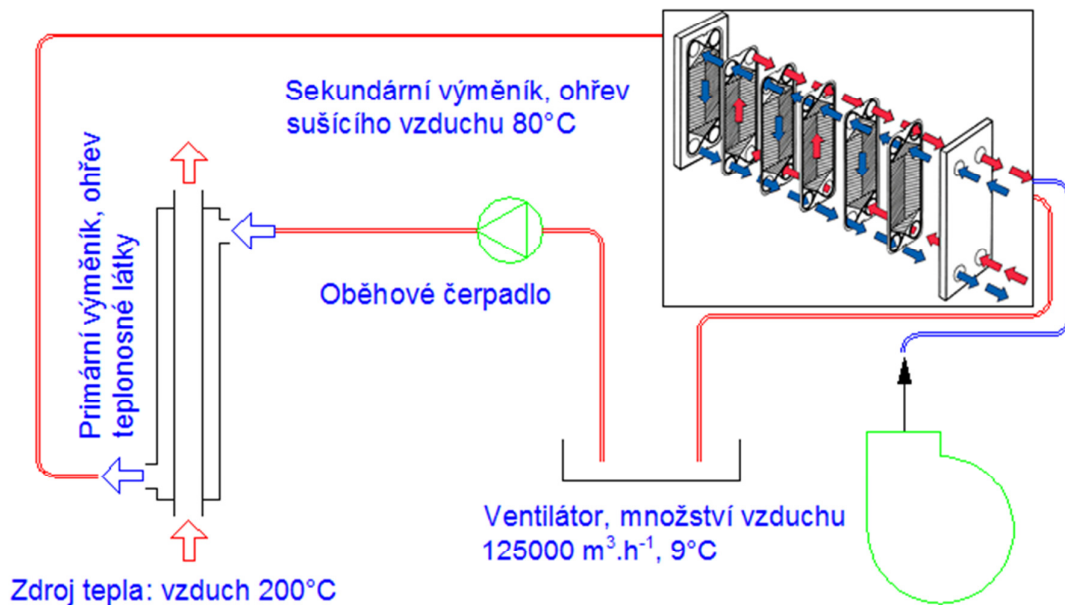
$$\overline{\Delta t}_{ln} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}} \quad (3.8)$$

$$\overline{\Delta t}_{ln} = \frac{(200 - 115) - (140 - 30)}{\ln \frac{200 - 115}{140 - 30}}$$

$$\overline{\Delta t}_{ln} = 96,9^\circ\text{C}$$

Určení Reynoldsova čísla

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_u}{\nu} \quad (3.9)$$



Obr. 3.22 Schéma strojního zařízení

$$Re = \frac{0,55 \cdot 0,005}{2,041 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re = 1347 \text{ [1]}$$

Určení Prandtlůva čísla

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \quad (3.10)$$

$$Pr = \frac{2,041 \cdot 10^{-6} \cdot 810,2 \cdot 2248,2}{0,138}$$

$$Pr = 26,9 \text{ [1]}$$

Vynucená konvekce

Kriteriální rovnice pro turbulentní proudění v mezi kruhové štěrbině je:

$$Nu = 0,015 \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8} \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{0,25} \quad (3.11)$$

$$Nu = 18 \text{ [1]}$$

Určení součinitele přestupu tepla

$$\alpha_0 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (3.12)$$

$$\alpha_0 = \frac{18 \cdot 0,138}{0,005}$$

$$\alpha_0 = 497 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Hustota tepelného toku pro válcovou stěnu

$$\dot{q} = \frac{\pi \cdot d \cdot \bar{\Delta t}_{ln}}{\frac{1}{\alpha}} \quad (3.13)$$

$$\dot{q} = 41,9 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tepelný tok na 1m délky

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot L \quad (3.14)$$

$$\dot{Q} = 41,9 \text{ kW}$$

Celková délka jednoho pole výměníku je 5 m. Počet výměníků v poli 12. Máme 4 pole
Tepelný tok na 1 výměník

$$\dot{Q}_v = \dot{Q} \cdot 5 \quad (3.15)$$

$$\dot{Q}_v = 41,9 \cdot 5$$

$$\dot{Q}_v = 209 \text{ kW}$$

Tepelný tok na 1 pole

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_v \cdot 12 \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_p = 209 \cdot 12$$

$$\dot{Q}_p = 2508 \text{ kW}$$

Tepelný tok na 4 pole

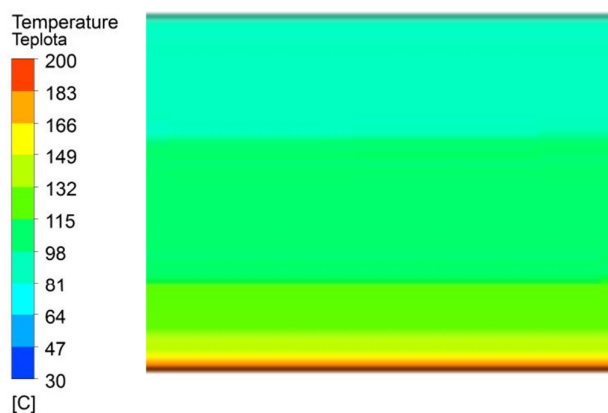
$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_p \cdot 4 \quad (3.17)$$

$$\dot{Q}_c = 2508 \cdot 4$$

$$\dot{Q}_c = 10 \text{ MW}$$

Určení teplot ve výměníku

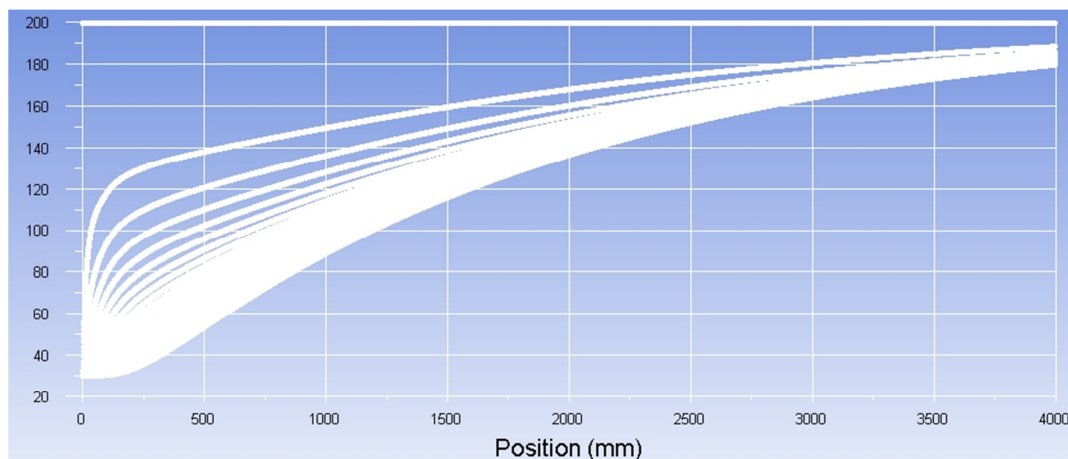
Pomocí numerického softwaru je ukázána teplota tak, jak se mění v závislosti na délce výměníku. Numerické operace ovšem nebyly cílem této práce. Proto se jimi v práci není detailně zabýváno. Z důvodu zjednodušení byla uvažována konstantní teplota teplosměnné plochy, a to 200°C.



Průběh teplot:

1m:	107,4°C
2m:	148,4°C
3m:	170,9°C
4m:	183,1°C

Obr.3.23 Závislost teploty oleje na délce výměníku



Graf 3.2 Graf závislost teploty oleje na délce výměníku

3.4.3 Shrnutí výpočtu výměníku

Protiproudý výměník typu trubka v trubce díky přímému kontaktu teplosměnné látky s povrchem dosahuje výkonu 41,9 kW na 1 m trubky. Pro celkový počet možných výměníků je možno dosáhnout výkonu až 10 MW.

3.5 Výpočet sekundárního výměníku

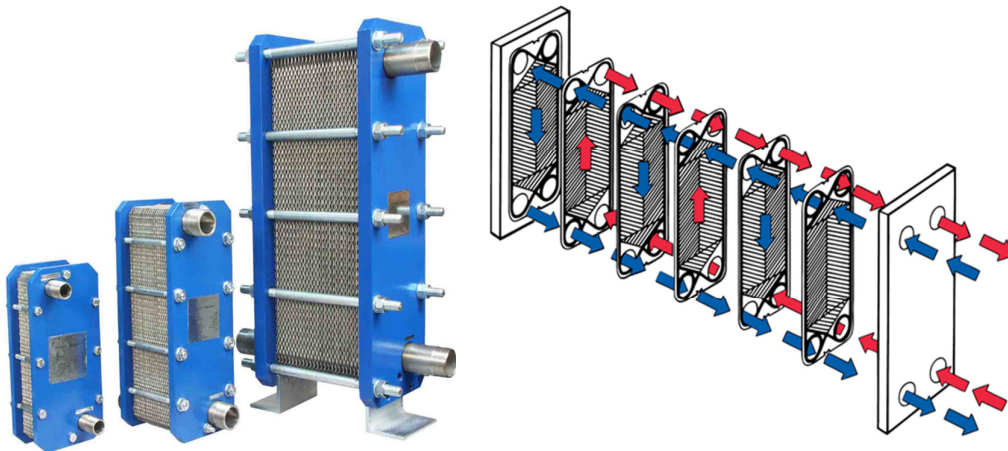
Při návrhovém výpočtu jde o určení teplosměnné plochy S . Protože lze vypočítat součinitel prostupu tepla k i výkon W_{\min} , je vlastně třeba vypočítat pouze počet převodových jednotek. Při návrhovém výpočtu výměníku musí být zadané alespoň tři teploty a z tepelné bilance se

snadno dopočítá teplota čtvrtá. Známé teploty určují účinnost výměníku a hodnota NTU (Number of Transfer Units – počet převodových jednotek) lze pak získat řešením Schnellerovy aproximace.

O chování výměníku rozhoduje především proud tekutiny s menší tepelnou kapacitou \dot{C}_{\min} . U výměníku s nekonečně velkou teplosměnnou plochou a ideálním protiproudým nebo křížovým uspořádáním toků by totiž bylo možno tento slabší proud zahřát až na vstupní teplotu silnějšího proudu. Tepelný výkon takového výměníku by pak byl maximální a určil by se pouze vstupními teplotami proudů.

3.5.1 Deskový výměník tepla

Deskový výměník tepla je soustava tenkých desek uspořádaných za sebou. Na povrchu těchto desek dochází k výměně tepla. Tímto uspořádáním dojde k vytvoření velkého povrchu pro přestup tepla. Výhodou je také kompaktní konstrukce a rozměrová flexibilita. Deskové výměníky se liší použitým materiálem, tvarem a uspořádáním desek. Nejčastěji jsou vyrobeny z nerezavějící oceli, ale desky mohou být také z jiných běžných materiálů. Deskové výměníky jsou snadno čistitelné, jsou použitelné pro vysoké teploty, málo se zanáší a mají nízké náklady na údržbu. Problémy s těsněním lze předejít svařením desek, to ovšem přináší jiné potíže,



Obr. 3.24 Deskový výměník [40]

jako například nutnost chemického čištění. Deskový výměník je znázorněn na (obr. 3.24).

3.5.2 Návrhový výpočet

Čtyři vstupní/výstupní teploty obou proudů jsou se skutečným výkonem výměníku vázány integrální tepelnou bilancí [41]:

$$\dot{Q} = W_1 |t_1' - t_1''| = W_2 |t_2' - t_2''| \quad (3.18)$$

Výpočet minimálního průtočného množství teplotnosné kapaliny

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_{\text{oil}} \cdot c_p \cdot (t_1' - t_1'') \\ \dot{m}_{\text{oil}} &= \frac{\dot{Q}_{\text{ov}}}{c_p \cdot (t_1' - t_1'')} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\dot{m}_{\text{oil}} = \frac{2\,535\,000}{2070 \cdot (115 - 30)}$$

$$\dot{m}_{\text{oil}} = 14,41 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výkon výměníku na straně oleje:

$$W_1 = \dot{M}_1 \cdot c_p \quad (3.20)$$

$$W_1 = 14,4 \cdot 2070$$

$$W_1 = 29,8 \text{ kW}$$

Výkon výměníku na straně vzduchu:

$$W_2 = \dot{M}_2 \cdot c_p \quad (3.21)$$

$$W_2 = 35,5 \cdot 1006$$

$$W_2 = 35,7 \text{ kW}$$

Skutečný výkon výměníku:

$$\dot{Q} = W_2 |t_2' - t_2''| \quad (3.22)$$

$$\dot{Q} = 35,7 |9 - 80|$$

$$\dot{Q} = 2535 \text{ kW}$$

Maximální výkon výměníku:

Z tabulek [39] byly získány vlastnosti teplotního oleje při teplotě 72,5°C: $\lambda = 0,142 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $c_p = 2070 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\nu = 4,175 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho = 838,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$.

Výpočet určující teploty

$$t_u = \frac{t_1' + t_1''}{2} \quad (3.7)$$

$$t_u = \frac{115 + 30}{2}$$

$$t_u = 72,5^\circ\text{C}$$

Výpočet maximálního možného teoretického výkonu

$$\dot{Q}_{\text{max}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_{\text{pair}} (t_{\text{max}}' - t_{\text{min}}') \quad (3.23)$$

$$\dot{Q}_{\text{max}} = 35,7 \cdot 1006 \cdot (115 - 9)$$

$$\dot{Q}_{\text{max}} = 3807 \text{ kW}$$

Technologická účinnost výměníku

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\text{max}}} \quad (3.24)$$

$$\varepsilon = \frac{2535}{3807}$$

$$\varepsilon = 67,5 \%$$

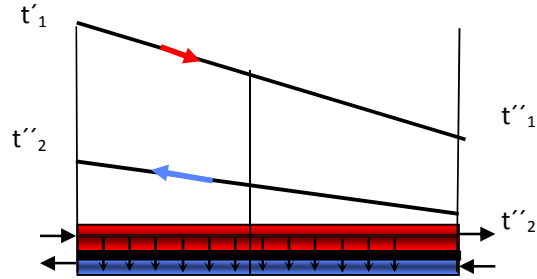
Výpočet velikosti teplosměnné plochy pomocí středního logaritmického spádu:

Výpočet středního logaritmického spádu

$$\overline{\Delta t}_{\ln} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''}} \quad (3.25)$$

$$\overline{\Delta t}_{\ln} = \frac{(115 - 80) - (30 - 9)}{\ln \frac{115 - 80}{30 - 9}}$$

$$\overline{\Delta t}_{\ln} = 27,5^\circ \text{ C}$$



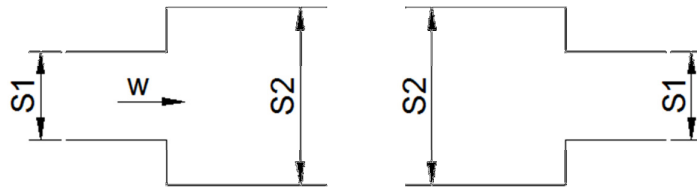
Obr. 3.25 Protiproudý výměník

Výpočet teplosměnné plochy

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \overline{\Delta t}_{\ln} \quad (3.26)$$

$$S = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \overline{\Delta t}_{\ln}}$$

$$S = 16,8 \text{ m}^2$$



Obr. 3.26 Protiproudý výměník

3.5.3 Návrh oběhového čerpadla

Pro výpočet průměru potrubí je uvažována rychlost 2 m.s^{-1} , celková délka 200 m

$$S = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot w} \quad (3.27)$$

$$S = \frac{14,4}{810,2 \cdot 2}$$

$$S = 0,009 \text{ m}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{S \cdot 4}{\pi}} \quad (3.28)$$

$$d = \sqrt{\frac{0,009 \cdot 4}{\pi}}$$

$$d = 106 \text{ mm}^2$$

Bernoulliho rovnice

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 + e_{\xi} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 + e_z \quad (3.29)$$

Výpočet místních tlakových ztrát primárního výměníku

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (3.30)$$

$$\xi_2 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right) \quad (3.31)$$

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{0,009}{0,0327}\right)^2$$

$$\xi_2 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,009}{0,0327}\right)$$

$$\xi_1 = 0,525$$

$$\xi_2 = 0,363$$

$$\xi_3 = \lambda_{tr} \cdot \frac{L}{d} \quad (3.32)$$

$$\lambda_{tr} = \frac{64}{Re} \quad (3.33)$$

$$\xi_3 = 0,05 \cdot \frac{64,5}{0,204}$$

$$\lambda_{tr} = \frac{64}{1347}$$

$$\xi_3 = 15,8$$

$$\lambda_{tr} = 0,05 [1]$$

Výpočet celkové tlakové ztráty primárních výměníků

$$\xi_{V1} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 \quad (3.34)$$

$$\xi_{V1} = 16,7 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta deskových výměníků je dle literatury (20 – 50) kPa [44] Pro výpočet je uvažována tlaková ztráta 35 kPa.

Třecí ztráta v potrubí

$$Re = \frac{w \cdot d_u}{\nu} \quad (3.9)$$

$$\lambda_{tr} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (3.35)$$

$$Re = \frac{2 \cdot 0,106}{4,175 \cdot 10^{-6}}$$

$$\lambda_{tr} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{50778}}$$

$$Re = 50778 [1]$$

$$\lambda_{tr} = 0,021$$

$$h_z = \lambda_{tr} \cdot \frac{L}{d} \quad (3.36)$$

$$h_z = 0,021 \cdot \frac{200}{0,106}$$

$$h_z = 39,7 \text{ Pa}$$

Součinitelé místních ztrát jsou dle literatury [45] pro oblouk hladký 0,3; rozdělovač potrubí se zaoblenými hranami 0,05; Celková místní ztráta je podle odhadu cca 8 Pa

$$e_{\xi} = e_z = \frac{w^2}{2g} \cdot (\xi_{V1} + \xi_{V2} + h_z + \xi_{Místní}) \quad (3.37)$$

$$e_{\xi} = e_z = \frac{2^2}{2g} \cdot (16,7 + 35000 + 39,7 + 8)$$

$$e_{\xi} = e_z = 7148 \text{ Pa}$$

Výpočet výkonu čerpadla

$$P = \dot{m} \cdot e_{\xi} \quad (3.38)$$

$$P = 14,4 \cdot 7148$$

$$P = 103 \text{ kW}$$

3.5.4 Návrh ventilátoru

Pro výpočet průměru potrubí je uvažována rychlost 5 m.s^{-1} , celková délka 20 m, hustota vzduchu při 9°C ; $\nu = 17,492 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho = 1,232 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$.

$$S = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot w} \quad (3.27)$$

$$S = \frac{34,7}{1,232 \cdot 15}$$

$$S = 5,6 \text{ m}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{S \cdot 4}{\pi}} \quad (3.28)$$

$$d = \sqrt{\frac{0,25 \cdot 4}{\pi}}$$

$$d = 2678 \text{ mm}$$

Třecí ztráta v potrubí

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_u}{\nu} \quad (3.9)$$

$$\text{Re} = \frac{5 \cdot 0,324}{17,492 \cdot 10^{-6}}$$

$$\text{Re} = 92613 \text{ [1]}$$

$$\lambda_{\text{tr}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad (3.35)$$

$$\lambda_{\text{tr}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{92613}}$$

$$\lambda_{\text{tr}} = 0,018$$

$$h_z = \lambda_{\text{tr}} \cdot \frac{L}{d} \quad (3.36)$$

$$h_z = 0,018 \cdot \frac{20}{2,678}$$

$$h_z = 0,14 \text{ Pa}$$

Součinitelé místních ztrát jsou dle literatury [45] pro oblouk hladký 0,3;

$$e_{\zeta} = e_z = \frac{w^2}{2g} \cdot (h_z + \xi_{V3} + \xi_{\text{Místní}}) \quad (3.37)$$

$$e_{\zeta} = e_z = \frac{5^2}{2g} \cdot (0,14 + 1000 + 0,6)$$

$$e_{\zeta} = e_z = 1275 \text{ Pa}$$

Výpočet výkonu ventilátoru

$$P = \dot{m} \cdot e_{\zeta} \quad (3.38)$$

$$P = 34,7 \cdot 1275$$

$$P = 44 \text{ kW}$$

3.5.5 Výpočet rozměrů sušárny

$$V = \frac{\dot{m}_c}{\rho_s \cdot \psi} \quad (3.39)$$

$$V = \frac{20000}{100 \cdot 0,3}$$

$$V = 666 \text{ m}^3$$

3.6 Ekonomické vyhodnocení sušení alternativního paliva

3.6.1 Ukazatele ekonomického vyhodnocení

Nejdříve je potřeba určit indikátory, které jsou směrodatné pro výpočet návratnosti investice z pohledu úspor za palivo.

Práce se zabývá dvěma indikátory:

TSR (Thermal Substitution Rate) - tepelná náhrada v %

TEE (Thermal Substitution Equivalent) - finanční náhrada v %

TSR vyjadřuje poměr tepelné spotřeby alternativních paliv vůči celkové tepelné spotřebě v systému. Je udáván v % a jeho účelem je měřit stupeň náhrady tradičních paliv palivem alternativním. Tento poměr vyjadřuje vzorec:

$$TSR = \frac{\text{Energie získaná z alternativních paliv}}{\text{Celková spotřebovaná energie}} \times 100 \quad (3.40)$$

TEE ukazuje ekonomický zisk při použití alternativních paliv jako vztah mezi cenou paliva, mixu alternativního a tradičního a cenou pokud by žádné alternativní palivo nebylo použito. Je udáváno v %. Jeho účelem je měřit ekonomický přínos nahrazením tradičních paliv palivem alternativním.

$$TEE = \left[1 - \frac{\text{Současná cena tepelné energie} \cdot (1 - TSR)}{\text{Současná cena tepelné energie z tradičních zdrojů}} \right] \times 100 \quad (3.41)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že úspora/zisk jsou závislé na celkové náhradě tepla (TSR) a při dávce alternativního paliva s vyšší výhřevností (uvažovaná stejná dávka – hmotnost) dosáhneme vyšší náhrady, substituce, tepelného příkonu palivem alternativním. Dalším efektem je snížený příkon H₂O do pecního systému, který sníží celkovou spotřebu tepla a vzhledem k nižšímu množství vody nám umožní optimalizovat celý proces výpalu z pohledu O₂ v pecním systému.

Dalším důležitým faktorem úspory je cena tradičního paliva. Čím je cena tradičního paliva vyšší, tím je celková úspora vyšší.

Posledním faktorem je úspora/zisk a poté následné zobchodování kreditů CO₂. Tento zisk je závislý na ceně jednoho kreditu CO₂ a zároveň zde působí jako multiplikační efekt náhrada tepla (TSR), [46].

3.6.2 Výpočet tepelné a finanční náhrady

Pro výpočet ekonomického zhodnocení byly použity následující hodnoty dle [47]: Potřeba tepelné energie je 3950MJ na výrobu 1kg slinku. Cena uhlí je 3000 Kč za tunu při výhřevnosti 30MJ/kg. Cena alternativního paliva je 500 Kč za tunu při vlhkosti 20% a výhřevnosti 18 MJ/kg. Výhřevnost alternativního paliva při vlhkosti 10% je 22 MJ/kg.

Za předpokladu že použijeme 1 jednotku tradičního paliva a 2 jednotky alternativního paliva je:

Materiál před sušením

$$TSR = \frac{\text{Energie získaná z alternativních paliv}}{\text{Celková spotřebovaná energie}} \times 100 \quad (3.40)$$

$$TSR = \frac{2 \cdot 18}{30 + 2 \cdot 18} \times 100$$

$$TSR = 55\%$$

$$TEE = \left[1 - \frac{\text{Současná cena tepelné energie} \cdot (1 - TSR)}{\text{Současná cena tepelné energie z tradičních zdrojů}} \right] \times 100 \quad (3.41)$$

$$TEE = \left[1 - \frac{4000 \cdot (1 - 0,55)}{3000} \right] \times 100$$

$$TEE = 40\%$$

Materiál po sušení

$$TSR = \frac{\text{Energie získaná z alternativních paliv}}{\text{Celková spotřebovaná energie}} \times 100 \quad (3.40)$$

$$TSR = \frac{2 \cdot 22}{22 + 2 \cdot 22} \times 100$$

$$TSR = 67\%$$

$$TEE = \left[1 - \frac{\text{Současná cena tepelné energie} \cdot (1 - TSR)}{\text{Současná cena tepelné energie z tradičních zdrojů}} \right] \times 100 \quad (3.41)$$

$$TEE = \left[1 - \frac{3200 \cdot (1 - 0,67)}{2200} \right] \times 100$$

$$TEE = 52\%$$

3.6.1 Výpočet ročních úspor při použití vysušeného paliva

Materiál před sušením

Z celkové energie 3950 MJ potřebné na výrobu 1 tuny slinku při 55% náhradě paliva je množství energie vyrobené z alternativního paliva 2172,5 MJ a z tradičního paliva 1777,5 MJ

Alternativní palivo:

$$AF = \frac{2172,5}{18} \quad (3.42)$$

$$AF = 120,7 \text{ kg}$$

Tradiční palivo:

$$TF = \frac{1777,5}{30} \quad (3.43)$$

$$TF = 59,3 \text{ kg}$$

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Při produkci 500 000 tun slinku ročně je cena za paliva:

$$\text{Price}_{\text{AF}} = 0,12 \cdot 500000 \cdot 500 \quad (3.44) \quad \text{Price}_{\text{TF}} = 0,059 \cdot 500000 \cdot 3000 \quad (3.45)$$

$$\text{Price}_{\text{AF}} = 30\,000\,000 \text{ Kč}$$

$$\text{Price}_{\text{TF}} = 88\,500\,000 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na palivo jsou 118 500 000 Kč

Materiál po sušení

Z celkové energie 3950 MJ potřebné na výrobu 1 tuny slinku při 67% náhradě paliva je množství energie vyrobené z alternativního paliva 2646,5 MJ a z tradičního paliva 1303,5 MJ.

Alternativní palivo:

$$\text{AF} = \frac{2646,5}{18} \quad (3.42)$$

$$\text{AF} = 147 \text{ kg}$$

Tradiční palivo:

$$\text{TF} = \frac{1303,5}{30} \quad (3.43)$$

$$\text{TF} = 43,5 \text{ kg}$$

Při produkci 500 000 tun slinku ročně je cena za paliva

$$\text{Price}_{\text{AF}} = 0,147 \cdot 500000 \cdot 500 \quad (3.44) \quad \text{Price}_{\text{TF}} = 0,044 \cdot 500000 \cdot 3000 \quad (3.45)$$

$$\text{Price}_{\text{AF}} = 36\,750\,000 \text{ Kč}$$

$$\text{Price}_{\text{TF}} = 66\,000\,000 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na palivo jsou 102 750 000 Kč.

4 Závěr

Diplomová práce se zabývala využitím tepla, které bez užitku uniká při procesu výroby slinku. Po prostudování dostupné literatury, zabývající se sušením bylo zjištěno, že na téma sušení bylo napsáno mnoho knih a článků. Z dostupných materiálů však bylo zjištěno, že sušení tak specifického materiálu, jako je rozdrčený odpad, se nikdo zatím nezabýval.

Úkolem práce bylo tedy zjistit možnosti využití odpadního tepla vznikajícího při technologickém procesu výroby slinku v rotační peci k sušení alternativního paliva a návrhu zařízení. Z toho vzešel další úkol, a to určení vlivu vlhkosti v materiálu na výhřevnost a experimentálně byla zjištěna lineární závislost.

Poté byla pomocí IR kamery vytipována místa, kde by se dalo odebírat teplo. S využitím výpočtového programu Fluent 6.1.12 bylo zjištěno, jaké teploty je možné dosáhnout při ohřevu teplotnosné látky.

Po provedení výpočtů byl navržen primární výměník, který by sloužil k ohřevu teplotnosné látky a sekundární výměník na ohřev sušícího vzduchu.

Dále zde je nastíněn výpočet oběhového čerpadla, ventilátoru a v neposlední řadě bubnové sušičky.

Při výpočtu ekonomické výhodnosti nebo návratnosti projektu je potřeba znát minimálně tři základní veličiny. Na straně nákladů jednak finanční objem investice a způsob jeho financování a náklady, které budeme potřebovat na provozování samotného zařízení. To znamená náklady fixní a variabilní. A objem nákladů, který ušetříme použitím kvalitnějšího a výhřevnějšího paliva s nižším obsahem vody, vyrobeného z odpadů. V této ekonomické úvaze je vynechána oblast investice i oblast nákladů na provozování samotného zařízení.

Byla vyčíslena pouze oblast úspor nákladů, které vzniknou nahrazením paliva tradičního (uhlí, zemní plyn, mazut) palivem alternativním (SRF). Výpočty naznačují, že při vysušení paliva o 10% vlhkosti by roční úspora na palivu byla 15,75 milionu Kč.

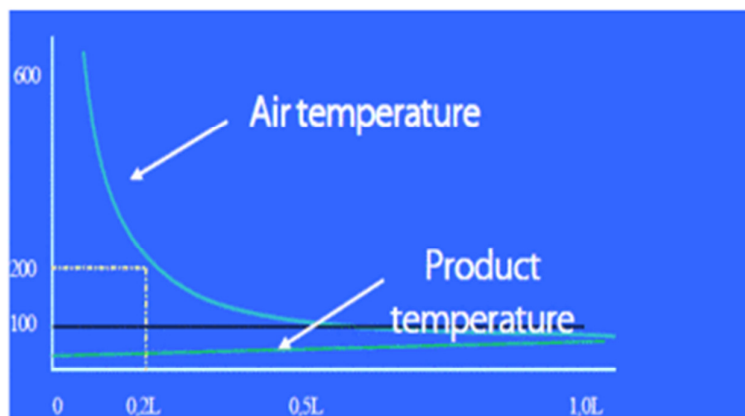
4.1 Navržené zařízení

Tepelná energie potřebná pro odpaření vody pochází z horkého vzduchu. Proud vzduchu se značně ochlazuje během procesu, přičemž teplota produktu samotného stěží stoupá.

Horký vzduch se spolu smísí s vlhkým produktem na vstupu do bubnu. Vzhledem k velkému teplotnímu rozdílu mezi horkým plynem a vlhkým produktem, se volná voda odpaří velice rychle a téměř 70% z odpařování vody probíhá v první části bubnu. Turbulentní proud teplého vzduchu, který proudí přes produkt, způsobuje rychlé počáteční odpařování volné povrchové vody.

Zbývá voda v materiálu je vázaná vlhkost, uvnitř produktu, a potřebuje více času na odpařování. Pro konečné sušení, a to až do výše 80% je potřeba delšího setrvání materiálu v bubnu. Během závěrečné fáze sušení, se zbývající voda pomalu odstraní při nízkých teplotních rozdílech mezi sušícím vzduchem a materiálem. To znamená, že kapilárně vázaná vlhkost v produktu se pomalu odpaří při nízké teplotě.

Adiabatická teplota sušení je v rozsahu maximálně 90 °C pro všechny systémy sušení. Nízká teplota sušeného produktu (80 - 90 °C) zabraňuje samovznícení [43].



Graf. 4.1 Typický průběh teplot horkého vzduchu a produktu v bubnu

Tab. 2 Shrnutí výsledků

Množství vzduchu potřebné k vysušení materiálu - 125000 [m³.h⁻¹]	
Tepelný tok potřebný na ohřátí sušícího vzduchu - 2535 [kW]	
Primární výměník	
Typ	odpadní vzduch/olej
Průměr teplosměnné plochy [mm]	275
délka [m]	4
Počet [ks]	15
Sekundární výměník	
Typ	deskový
Teplosměnná plocha [m ²]	16,8
Oběhové čerpadlo	
Výkon [kW]	103
Ventilátor	
Výkon [kW]	44
Sušárna	
Objem [m ³]	666
Finanční vyhodnocení pro produkci 500 000t slínku	
Úspory nákladů za palivo v milionech [Kč]	15,75

4.2 Možné pokračování diplomové práce

Diplomová práce se zabývala využitím tepla, které bez užitku uniká při procesu výroby slínku. Byla vybrána možná místa odběru tepla a vypočítán tepelný výkon nutný k vysušení materiálu o hmotnostním toku 20 tun za hodinu.

Veškeré výpočty vycházeli z množství vody, kterou je nutné odpařit z materiálu o počáteční vlhkosti 20% na vlhkost 10%. Problém ovšem vzniká, že materiál o vlhkosti 20% má vlhkost vázanou uvnitř, v kapilárách. Proto určit množství tepla potřebné k odpaření je

ZÁVĚR

velice obtížné. Pro zjištění přesných hodnot by bylo nutné sestavit experimentální zařízení a provést měření.

Jednou z možností, jak provádět sušení při výrazně vyšší teplotě sušícího vzduchu a tím využít větší teplotní spád (graf 4.1), je použít vyčištěné a ochlazené spaliny, které vznikají při procesu výroby slinku. Tyto spaliny mají již teplotu 80°C. Ale velkou výhodou je, že mají obsah O₂ pouze 6%. Toto by ovšem bylo také nutné ověřit experimentálně.

5 Seznam použité literatury

- [1] Vondráček, Rudolf, 1881-1938: Absorpce plynů při sušení paliv / Dr. Rudolf Vondráček a Břetislav Hlavica. -- Praha : Prometheus, [1925]. Zvl. otisk z Hornického věstníku, 1925. Paliva a topení, 11, 3
- [2] Černý, Emil: Dosušování obilí a píce obyčejným i vyhřátým vzduchem / vynalezl a popsal Emil Černý. -- Praha : Nákladem Českomoravských podniků tiskařských a nakladatelských, 1926
- [3] Šmíd, Václav: Technické informace: odpadní teplo a jeho využití, Praha: UTEIN, 1958
- [4] Pawlica, Rudolf: Modernizace mobilních sušáren ZSPŽ-8 Praha: Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství, 1980
- [5] Využití netradičních zdrojů energie ve vytápění - sluneční, geotermální, bioplyn, odpadní teplo. -- Praha : Dům techniky ČSVTS, 1988
- [6] Haš, Stanislav: Racionalizace spotřeby paliv a netradiční zdroje energie. Výzk. ústav zemědělské techniky VÚZT, 1989
- [7] Hutla, Petr: Sušení dřevní štěpky ve velkokapacitních senících, ISSN 1210-4922. -- Roč. 9, č. 2 (1999)
- [8] Neuberger, Pavel: Automatizované řízení sušícího procesu ve velkokapacitním seníku, Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta
- [9] Kavan, Vít: Spalování vylisovaných vyslazených řepných řízků. Výzk. ústav cukrovarnický VUC (1999)
- [10] Adamovský, Radomír: Metody hodnocení účinnosti výměníků pro zpětné získávání tepla z větracího vzduchu, In: Možnosti využití energetických zdrojů v zemědělství. -- Praha: Česká zemědělská univerzita, 1996. -- ISBN 80-213-0275-5. -- s. 3-8
- [11] Využití odpadu jako paliva : sborník přednášek ze semináře, 14.10.1998 Dům techniky Pardubice. -- Chrudim : Vodní zdroje Ekomonitor, 1998 ISBN 80-238-3352-9
- [12] Hutla, Petr: Optimalizační procesy při dosoušení energetických plodin. Výzk. ústav zeměděl. techniky VÚZT (2000)
- [13] Hutla, Petr: Optimalizace sušení odpadní kůry pro energetické využití / Petr Hutla Výzkumný ústav zemědělské techniky, Václav Sladký Výzkumný ústav zemědělské techniky. -- 12 grafů, 1 tab. -- Res. čes., angl. -- Lit. s. 53-54 (5 záz.)
- [14] Pawlica, Rudolf: Výzkum technologií pro modernizaci posklizňového ošetření zrnin snížením energetické spotřeby, snížením nákladů a zvýšením kvality finálních produktů / Rudolf Pawlica. -- Praha-Ruzyně : Výzk. ústav zemědělské techniky VÚZT, 2001. -- 74 s. : 33 obr., 19 tab. + 5 příl.
- [15] Kolat, Pavel: Energetické využití biopaliva na bázi kalů z čistíren odpadních vod / Pavel Kolat Vysoká škola báňská TU, Dagmar Juchelková, Petr Šušák, Anna Cernáková, In: 3T. Teplo, technika, teplotářství. -- ISSN 1210-6003. -- Roč. 14, č. 1 (2004), s. 22-26
- [16] Raclavská, Helena: Technologie zpracování a využití kalů z ČOV, Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007 ISBN 978-80-248-1600-5
- [17] Kára, Jaroslav: Technologické systémy pro využití biopaliv z energetických plodin [elektronický zdroj] Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2005. -- 1 CD. -- (Zpráva VÚZT č. Z-2436)

- [18] Predpoklady využívania poľnohospodárskej a lesníckej biomasy na energetické a biotechnické využitie : zborník referátov a diskusných príspevkov z vedeckej rozpravy XXXI. valného zhromaždenia členov Slovenskej akadémie pôdohospodárskych vied, konaného 5. decembra 2007 v Slovenskom centre poľnohospodárskeho výskumu v Nitre / zostavovateľ zborníka Richard Markovič. -- Nitra : Agentura Slovenskej akadémie pôdohospodárskych vied, 2007. (Zborník; č. 58), ISBN 978-80-89162-32-1
- [19] Hutla, Petr: Aerodynamický odpor vrstvy energetické štěpky- Aerodynamic resistance of the layer of energy wooden chips ISSN 1211-3174. -- Roč. 36, č. 3 (2005), s. 113-120
- [20] Pawlica, Rudolf: Odpadní teplo z BPS lze využít k sušení Rubrika: Zemědělství, In: Agrární obzor. -- ISSN 1214-1291. -- Č. 23-24 (20091221), s. 13
- [21] T. Ivanova Drying of cherry tree chips in the experimental biomass dryer with solar collector, ISSN 1212-9151.
- [22] Krutil, Jaroslav: Numerické modelování proudění tekutin s přestupem tepla a hořením v průmyslových aplikacích: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012 ISBN 978-80-248-2700-1
- [23] http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/vyroba_cementu.htm (navštíveno dne 20.4.)
- [24] <http://www.odpadoveforum.cz> (navštíveno dne 28.4.)
- [25] návod k obsluze Hygrometr IR 5000 od společnosti GreCon
- [26] www.inmes.hr/pdf/thermography.pdf (navštíveno dne 28.4.)
- [27] <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf> (navštíveno dne 28.4.)
- [28] http://www.general-files.com/download/g631e5aedh32i0/T559243_APAC.pdf.html (navštíveno dne 26.4.)
- [29] <http://www.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.text.k25.suseni.pdf> (navštíveno dne 26.4.)
- [30] <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/postupy.html>
- [31] <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13534/V%C3%BDm%C4%9Bn%C3%ADky%20tepla.pdf?sequence=1> (navštíveno dne 30.4.)
- [32] PAVELEK, M. *Termomechanika*, skripta VUT, 3. vyd., VUT v Brně 2003, ISBN 80-214-2409-5
- [33] http://www.powerwiki.cz/wiki/OOEET_ResenePriklady
- [34] ŠESTÁK, J., RIEGER, F., *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*, skripta ČVUT, 3. vyd., v Praze 2005
- [35] <http://zsc.zcu.cz/sw/fluent.html> (navštíveno dne 1.5.)
- [36] Interní předpis, 130306_PP5_Laboratorní postupy V2Z6
- [37] <http://www.fluke.com> (navštíveno dne 26.3.)
- [38] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Tubular_heat_exchanger.png (navštíveno dne 26.4.)
- [39] Petříková, Markéta. Kryštůfek, Pavel: Tabulky a diagramy pro termodynamiku
- [40] <http://www.mxmach.com/gasket-and-frame-plate-heat-exchangers/> (navštíveno dne 24.4.)
- [41] http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/2905/r%C5%AF%C4%8Dka_2007_dp.pdf?sequence=1 (navštíveno dne 30.4.)
- [42] <http://www.bcb-plzen.eu/alfalaval/rozebiratelne.htm> (navštíveno dne 20.4.)
- [43] <http://www.vadeb.com/products/drum-dryers/drying-drum-process-multi-pass/>

(navštíveno dne 26.4.)

[44] users.fs.cvut.cz/~zitnyrud/TZA4.ppt

[45] <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/21-hodnoty-soucinitelu-mistnich-ztrat-zdroje-tepla-a-zakladni-tvarovky-potrub>

[46] Holcim portal HARP (Holcim Accounting & Reporting Platform).

[47] (zdroj: Holcim.)